SUSTENTABILIDADE MEIO AMBIENTE RESPONSABILIDADE SOCIAL

ARTIGOS SELECIONADOS

(Organizador)
José Henrique Porto Silveira

Editora Poisson

VOLUME 13

José Henrique Porto Silveira
(Organizador)

Sustentabilidade, Meio Ambiente e Responsabilidade Social:

Artigos Selecionados

Volume 13

1ª Edição

Belo Horizonte
Poisson
2026

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586s
Sustentabilidade, Meio Ambiente e Responsabilidade Social: Artigos Selecionados - Volume 13 / Organização: José Henrique Porto Silveira – Belo Horizonte MG: Editora Poisson, 2026. 170 p.

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-684-4
DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Sustentabilidade 2. Meio Ambiente 3. Responsabilidade Social. 1. SILVEIRA, José Henrique Porto 2. Título

CDD-363.7

SÔNIA MÁRCIA SOARES DE MOURA – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: O desenvolvimento sustentável e a importância para a sociedade civil06

Alessandra Aparecida Berton Rodrigues, Sandro Antônio Malinowski, Simone Cabral Castagnoli

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.01

Capítulo 2: Ressignificação dos resíduos agroindustriais oriundos da cana-de-açúcar em insumos circulares e subprodutos 18

Beatriz Rodrigues de Lima, Joelise de Alencar Figueira Angelotti

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.02

Capítulo 3: Economia circular e o efeito ricochete: desafios à gestão sustentável dos recursos naturais no ciclo de vida dos produtos 43

Glaucia Brenny, Adacto Benedicto Ottoni, Nilo Sampaio

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.03

Capítulo 4: Tendências de precipitação e dias secos na Bacia do Rio Formoso (TO): implicações para a gestão de recursos hídricos..... 57

Fabrício Kauan da Silva Santos, Roberta Araújo e Silva, Girlene Figueiredo Maciel

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.04

Capítulo 5: Utilização de estatística multivariada para estudar a poluição em um corpo d'água específico na região sul do estado do Rio de Janeiro..... 68

Nilo Antonio de Souza Sampaio, Glaucia Maria Brenny, Victória do Nascimento Rodrigues

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.05

Capítulo 6: A dinâmica da pecuária e a pressão ambiental: uma análise dos frigoríficos e do desmatamento em Rondônia..... 78

Isabela Soster da Pont, Jonathan Gonçalves da Silva, Roselaine Bonfim de Almeida, Leandro Vinícios Carvalho

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.06

Capítulo 7: Mini revisão sobre a remoção biológica aprimorada do fósforo: fundamentos, fatores operacionais e perspectivas futuras 89

Letícia Fabris, Taiane Guedes, Delmira Beatriz Wolff, Elvis Carissimi, Salatiel Wohlmuth Da Silva, Jandira Leichtweis

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.07

SUMÁRIO

Capítulo 8: Valorização de resíduos de casca de abacaxi como bioadsorvente para remoção de azul de metileno: estudos cinéticos e isotérmicos 100

Heloyse Reges Chaves, João Victor Silva Sousa, Ana Vitória Santos Marques, Meiry Gláucia Freire Rodrigues, Tellys Lins Almeida Barbosa

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.08

Capítulo 9: Valorização do resíduo de bauxita por meio da adsorção do corante vermelho congo 118

Ana Vitória Santos Marques, Heloyse Reges Chaves, Tellys Lins Almeida Barbosa, Meiry Gláucia Freire Rodrigues

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.09

Capítulo 10: Membranas verdes para um futuro azul: remoção de azul de metileno com serragem da madeira..... 132

João Victor Silva Sousa, Ana Vitória Santos Marques, Heloyse Reges Chaves, Francirmarcio Geraldo da Silva Gambarra, Tellys Lins Almeida Barbosa, Meiry Gláucia Freire Rodrigues

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.10

Capítulo 11: Aplicação de ferritas suportadas em biochar em processos oxidativos avançados: uma mini revisão 144

Jandira Leichtweis, Letícia Camargo Fabris, Taiane da Silva Guedes, Ana Carolina Ferreira Piazzi Fuhr, Elvis Carissimi, Luis Guillermo Ramírez Mérida, Salatiel Wohlmuth da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.11

Capítulo 12: Síntese e caracterização de ZIF-8: influência do solvente na formação do nanomaterial 156

Ana Vitória Santos Marques, João Victor Silva Sousa, Tellys Lins Almeida Barbosa, Meiry Gláucia Freire Rodrigues

DOI: 10.36229/978-65-5866-684-4.CAP.12

Autores 141

Capítulo 1

O desenvolvimento sustentável e a importância para a sociedade civil

Alessandra Aparecida Berton Rodrigues
Sandro Antônio Malinowski
Simone Cabral Castagnoli

Resumo: O presente trabalho objetiva abordar questões sustentáveis e a relevância para a sociedade civil pois, a partir da sustentabilidade foram criados congressos para discutir o assunto e de quais maneiras poderiam reduzir estes impactos. Foi elaborado um plano de ação com 17 objetivos do desenvolvimento sustentável. No que tange a esta relevância na sociedade civil, destaca-se que a incorporação dos princípios da sustentabilidade transcende o âmbito meramente teórico, assumindo papel estruturante na formulação de políticas públicas, na atuação das organizações privadas e, sobretudo, na transformação dos padrões de comportamento individuais e coletivos. A adoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como diretriz global evidencia a necessidade de integração entre desenvolvimento econômico, inclusão social e preservação ambiental, impondo à sociedade civil um protagonismo ativo na fiscalização, implementação e difusão dessas práticas. Assim, a efetividade desse novo paradigma depende não apenas de iniciativas institucionais, mas também do engajamento consciente dos cidadãos, que passam a atuar como agentes de mudança na promoção de um modelo de desenvolvimento mais equilibrado, ético e sustentável.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Socidade Civil.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo objetiva analisar qual a relevância do desenvolvimento sustentável e sua importância para a sociedade civil. Assim, faz-se necessário apresentar o histórico do desenvolvimento sustentável mediante a literatura, discorrer sobre os objetivos do desenvolvimento sustentável de acordo com teóricos e abordar questões relevantes sobre a sociedade civil e o respectivo assunto. O tema do desenvolvimento sustentável é de grande importância para o mundo em virtude da ampliação da consciência da sociedade nos últimos anos visto o impacto que poderá trazer para sociedade, ou seja, para as próximas gerações.

2. HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Segundo Boff (2016) o conceito de sustentabilidade já possui mais de 400 anos, contudo só partir do século XX que se iniciou esta forte conscientização, por meio de uma reunião realizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) na qual foi alavancada de que forma preservar os recursos naturais.

De acordo com Boff (2016), a origem do conceito sustentabilidade se iniciou em todo o mundo antigo tendo seu percurso até a idade média, no qual eram utilizados artefatos produzidos através da extração de madeira, tais como combustível para os fogões, aparelhos agrícolas e principalmente na construção de barcos os quais se fez muito presentes no século XVI, com esta extração desenfreada Espanha e Portugal começaram a ficar com suas florestas escassas, apesar disto só em 1.560 na província de Saxônia, Alemanha apresentou esta preocupação com a recuperação das áreas desmatadas, de forma a manter recursos às próximas gerações.

Como afirma o autor,

> Foi somente em 1713, de novo em Saxônia com o capitão Hans Carl Von Carlowitz, que a palavra sustentabilidade se transformou em um conceito estratégico. Haviam se criado fornos de mineração que demandavam muito carvão vegetal, extraído da madeira, Florestas eram abatidas para atender esta nova frente do progresso. Foi então que Carlowitz escrever um verdadeiro tratado na língua cientifica da época, o latim sobre a sustentabilidade (nachhaltig wirtschaften: organizar de forma sustentável) das flores com o título de Silveicultura a economia. Propunha enfaticamente o uso sustentável da madeira. Seu lema era '' devemos trata a madeira com cuidado (man muss mit dem Holz pfleglih umgehen) caso contrário acabar-se-á com o negócio e cessará o lucro (BOFF 2016, p.35).

É possível então perceber que, o conceito de sustentabilidade já possui longos anos de existência, contudo só ganhou efetiva relevância quando os bens primários utilizados produção em massa apresentaram sinais de escassez por conta da utilização desenfreada, a Alemanha foi a primeira a se preocupar com os impactos que essa atividade poderia trazer ao futuro das próximas gerações, adotando medidas que pudessem diminuir os impactos.

De acordo com Nascimento (2012 p.52),

> A ideia de sustentabilidade ganha corpo e expressão política na adjetivação do termo desenvolvimento, fruto da percepção de uma crise ambiental global. Essa percepção percorreu um longo caminho até a estruturação atual, cujas origens mais recentes estão plantadas na década de 1950, quando pela primeira vez a humanidade percebe a existência de um risco ambiental global: a poluição nuclear. Os seus indícios alertaram os seres humanos de que estamos em uma nave comum, e que problemas ambientais não estão restritos a territórios limitados.

Percebe-se que só a partir de 1950 os países começam a demonstrar preocupação, ao perceberem que estes impactos seriam globais, a partir disto foram criadas conferências para debater sobre o tema visto que os impactos já podem ser percebidos como quando ocorreram as chuvas ácidas, feitos que motivaram na Conferência de Estocolmo aonde haviam países desenvolvidos e não desenvolvidos, porém percebe-se que os países desenvolvidos não gostam destes debates e na maioria das vezes não aceitam o que é elaborado e proposto, pois com isto teriam que mudar as maneiras de produção e utilização de matérias, no peso da balança eles preferem ficar com o título de potência mundial do que potência sustentável.

Segundo Boff (2016), na conferência das Nações Unidas, em Estocolmo na Suécia em 1972, foi discutida a maneira de utilizar os recursos sem comprometer as próximas gerações, contudo os países entraram em um debate, pois não constava outra opção que não gerasse a poluição e deterioração dos recursos naturais, a próxima conferência realizada ocorreu em 1984 e deu origem à Comissão Mundial sobre o Meio.

Segundo Peñafiel e Radomsky (2013, p.161), '' cerca de 20 anos depois da conferência de Estocolmo, a ONU propôs uma nova conferência que viesse a implementar ações mais efetivas e pontuais quanto aos problemas ambientais.''

Os autores ainda discorrem a respeito da realização de uma comissão nomeada Comissão Mundial do Meio Ambiente e Desenvolvimento, cuja finalidade era preparar um documento para que a conferência pudesse ser realizada no Rio de Janeiro, o documento ficou pronto, no entanto, só depois de 5 anos ocorre a Eco-92 realizada em 1992 pelas Nações Unidas para o desenvolvimento e o Meio ambiente.

De modo geral, a conferência de Estocolmo não obteve o resultado esperado, que tinha como tema principal auxiliar os países em desenvolvimento e os países desenvolvidos a realizar a desaceleração isso não ocorreu, pois, os países desenvolvidos têm a ganância de ter o título de ser a potência mundial deixando de lado o que havia sido proposto. Após longos anos foi proposta uma nova conferência que era mais assertiva e com todos os problemas detalhados a partir desta conferência foi elaborado o documento na qual serviria como base para a conferência de 1992. Assim, de acordo com o autor '' durante o encontro, uma série de documentos foi elaborada, tais como a Carta da terra, as convenções da diversidade biológica, da desertificação e as mudanças climáticas e a Agenda 21''. (Peñafiel e Radomsky, 2013, p. 163).

Ainda nesta consideração, a carta da Terra também pode ser considerada como o principal documento da Eco-92, em que 176 países aceitaram o plano de ação proposto e o modelo de desenvolvimento ambientalmente sustentável (PENAFIEL E RADOMSKY, 2013).

E, como a Conferência de Estocolmo não teve tanto sucesso quanto ao esperado, a ECO-92 tinha algumas problemáticas a fim de solucionar, a partir disto foi criado um novo documento - a Carta da Terra – em que vários países se comprometeram com o

estabelecido, é possível perceber mais uma vez que as expectativas estão apenas em um documento, sem garantia de que vai ser realizada, afinal se um país não cumprir o que assinou os demais deixaram de realizar também, por questão de poder e concorrência e mais uma vez será de certo modo perdido.

Já a ECO-92 teve mais efetivação em relação a conferências anteriores, dentro dela há documentos específicos, nota-se também maior participação por parte das Organizações Não Governamentais e da população, de certo modo uma parte da população se conscientizou e começou a cobrar mais efetivação em relação ao desenvolvimento sustentável. pois estabeleceu o compromisso de todos os países em relação ao desenvolvimento para que a sustentabilidade fosse garantida.

Ainda nesta consideração Veiga (2005, p. 115) '' afirma que a conferência foi um dos primeiros grandes encontros em que o futuro do meio ambiente foi debatido em âmbito mundial''.

Nota-se que a partir deste momento todos os Estados possuem grande responsabilidade quanto à execução e fiscalização foi exposto com problemas em âmbito mundial quanto ao meio ambiente, tanto na geração de resíduos que vão aos mares, quanto ao aquecimento mundial. De acordo com Boff (2016), o desenvolvimento sustentável pode ser definido como algo que deve ser atingido ou então como um indicador no processo de produção dentro das regras de sustentabilidade, contudo não obedece a realidade. Pois,

> de 20-22 de junho de 2012 ocorreu no Rio de Janeiro uma megaconferência, outra Cúpula da Terra, promovida pela ONU, intitulada RIO+20, que se propôs fazer um balanço dos avanços e dos retrocessos do binômio '' desenvolvimento e sustentabilidade'' no quadro das mudanças trazidas pelo aquecimento global, pela clara diminuição dos bens e serviços da terra, agravada pela crise econômico-financeira iniciada em 2007, que atingiu o sistema global a partir de países centrais da ordem capitalista e aprofundando-se mais e mais a partir de 2011 (BOFF, 2016, p. 39).

Assim, a grande finalidade desta conferência, foi sinalizar sobre o desenvolvimento sustentável consciente e os impactos que isso vai ter se nada for alterado, a partir disso várias conferências foram realizadas para tratar o tema, o aquecimento global e os impactos já podem ser presenciados, como o descarte incorreto de resíduos por parte de países desenvolvidos, que já está se tornando montanhas de plásticos em praias com correntes marítimas.

Nesse sentido, é importante entender do que se tratam os objetivos do desenvolvimento sustentável.

2.1. OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ODS

Com o entendimento das principais funções da administração faz-se necessário compreender alguns conceitos sobre as empresas e seus portes. Consideradas como organismos são compostas de recursos e visam ao final de seus processos a obtenção de capitais econômicos seja através da produção de bens, de vendas ou até mesmo através de serviços. Segundo Maximiano (2006) a empresa tem o objetivo central de fabricar e comercializar produtos destinados a pessoas ou a mercados para ao final de seu processo conseguir a desejada obtenção de ativos. Para que isso seja possível, as organizações

tendem a adquirir matéria prima, estruturar seus sistemas de operação e firmar compromissos de satisfação do cliente.

Conforme explanado por Chiavenato (2012) as empresas são constituídas de pessoas que trabalham em conjunto e possuem o sentido de alcançar seus objetivos através dos recursos disponíveis, sendo eles: humanos, materiais ou financeiros. Segundo Drucker (2012) para entender o significado de uma instituição empresarial, é necessário conhecer seu principal propósito, que por sua vez, deve manter o foco no ambiente externo da organização, pois o mais importante para todas as empresas, independentemente de seu tamanho, é a criação de clientes e consumidores externos.

Diversos estudos já foram feitos para uma definitiva definição de pequena empresa citando inúmeros critérios como quantidade de funcionários, quantidade de vendas ou até mesmo o valor de ativos, porém, ainda não existe uma definição que seja universalmente aceita e, seguindo esta análise pode-se notar que o desenvolvimento sustentável veio se aprimorando ao decorrer das décadas e que por conta disto se elaborou objetivos que devem ser traçados para que haja uma efetiva chance de sucesso.

De acordo com Roma (2019, s/d),

> '' o marco fundador dos ODM foi a Resolução nº 55/2 da Assembleia Geral da ONU, que entrou para a história com o nome de "Declaração do Milênio das Nações Unidas". Esta foi adotada de forma unânime por chefes de Estado e altos representantes de 191 países, durante a 55ª sessão da Assembleia Geral, a chamada "Cúpula do Milênio das Nações Unidas", realizada de 6 a 8 de setembro de 2000, na sede da ONU, em Nova Iorque, Estados Unidos. Segundo esse importante documento, o principal desafio a ser enfrentado àquela época era garantir que a globalização se tornasse uma força positiva para todos os povos do mundo, uma vez que, embora fosse reconhecido que esta oferecesse grandes oportunidades, seus benefícios eram compartilhados de maneira desigual pelas nações, com os países em desenvolvimento e economias em transição enfrentando grandes dificuldades para alcançá-los, ainda que sentissem os seus elevados custos.''

Para o autor, o Brasil só foi estabelecido por meio de um decreto em que foi assinado em 2003, no qual fazia referência dos indicadores brasileiros com os propostos pelas ODS, deste modo não ficando formados os indicadores internacionais e nacionais iguais, visto que cada nação tem sua característica. E,

> '' Os resultados obtidos ao longo da implementação dos ODM em nível nacional foram sumarizados em cinco Relatórios Nacionais de Acompanhamento [1], elaborados em parceria por diversas instituições do governo federal e agências integrantes do Sistema ONU no Brasil. O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) foram responsáveis pela seleção e análise dos indicadores utilizados, articulação dos grupos temáticos instituídos e por consolidar os textos finais dos relatórios nacionais (ROMA, 2019, s/d). ''

Em relação ao conceito dos ODS, tem-se conforme o Itamaraty (2019, s/d) que eles,

> Foram concluídas em agosto de 2015 as negociações que culminaram na adoção, em setembro, dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), por ocasião da Cúpula das Nações Unidas para o desenvolvimento sustentável.

E tiveram seu início em 2013, quando foram implementadas medidas nacionais e internacionais a partir da Conferência Rio+20, na qual tinha como objetivo principal elaborar medidas para os próximos 15 anos, mantendo atualizado os (ODS). A agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (2015) coloca 17 objetivos conforme tabela 01.

Tabela 01: Os 17 Objetivos do desenvolvimento Sustentável.

Objetivo	Descrição
Objetivo 01	Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares
Objetivo 02	Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável
Objetivo 03	Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades
Objetivo 04	Assegurar a educação inclusiva e equitativa de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos
Objetivo 05	Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas
Objetivo 06	Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos
Objetivo 07	Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos
Objetivo 08	Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos
Objetivo 09	Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação
Objetivo 10	Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles
Objetivo 11	Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis
Objetivo 12	Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis
Objetivo 13	Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e s

Fonte: ONUBR – Nações Unidas no Brasil

Percebe-se então que, o Brasil sempre teve grande preocupação com os impactos ambientais gerados pela globalização, estando aberto a debates e negociações como a adequação de métricas para atingir o que ficava estabelecido nos comitês, contudo a execução não vem sendo realizado como o planejado.

Em relação à agenda 2030, a Organização das Nações Unidas (2019, s/d) traz que,

> Todos os países e todas as partes interessadas, atuando em parceria colaborativa, implementarão este plano. Estamos decididos a libertar a raça humana da tirania da pobreza e da penúria e a curar e proteger o nosso planeta. Estamos determinados a tomar as medidas ousadas e transformadoras que são urgentemente necessárias para direcionar o mundo para um caminho sustentável e resiliente. Ao embarcarmos nesta jornada coletiva, comprometemo-nos que ninguém seja deixado para trás.

Em complemento, de acordo com Rodrigues, Buczenko e Pscheidt (2019), os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são formados por 17 itens e 169 metas os quais foram elaborados pelos Estados membros da ONU, e que sejam aplicados de maneira mundial, os objetivos são apresentados conforme a figura 1:

Figura 01: Símbolos dos ODS

Fonte: ONUBR – Nações Unidas no Brasil (2015)

Conforme os autores retratam a sustentabilidade é uma fonte esgotável de recursos se a sua utilização for incorreta, desta forma os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável foram elaborados com a finalidade de assegurar um futuro às próximas gerações contando com o apoio de vários países, com isto está surgindo uma nova maneira de se consumir com mais consciência com olhar para o futuro.

2.2. A SOCIEDADE CIVIL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A sociedade civil ocupa posição central na consolidação do desenvolvimento sustentável, assumindo papel ativo na transformação dos paradigmas econômicos, sociais e ambientais contemporâneos. Sua atuação não se limita à participação periférica em debates institucionais, mas se projeta como elemento estruturante na construção de práticas sustentáveis, na fiscalização das políticas públicas e na indução de comportamentos socialmente responsáveis.

O desenvolvimento sustentável, conforme delineado na literatura especializada, não pode ser compreendido de forma fragmentada, devendo necessariamente articular crescimento econômico, justiça social e preservação ambiental. Nesse sentido, Sachs (2002) sustenta que a sustentabilidade exige uma abordagem integrada e multidimensional, na qual tais elementos coexistam de forma equilibrada, de modo a garantir não apenas o progresso econômico, mas também a equidade social e a proteção dos recursos naturais. Essa concepção evidencia que a efetivação desse modelo depende, em grande medida, da participação ativa da sociedade civil.

Nessa mesma linha, Veiga (2005) aponta que o desenvolvimento sustentável constitui um processo dinâmico de transformação estrutural, envolvendo mudanças nos padrões de produção, consumo e organização social. Para o autor, a superação do modelo tradicional de desenvolvimento exige a internalização de valores sustentáveis pela coletividade, o que reforça o protagonismo da sociedade civil na condução dessas mudanças.

Sob uma perspectiva ética e civilizatória, Boff (2012) destaca que a sustentabilidade ultrapassa os limites de uma abordagem técnica, configurando-se como um imperativo moral voltado à preservação da vida em todas as suas dimensões. Nesse contexto, a

sociedade civil emerge como espaço privilegiado de construção de consciência crítica e de difusão de valores que orientem práticas responsáveis e solidárias.

No campo da teoria política, Bobbio (1982) compreende a sociedade civil como esfera autônoma de organização social, distinta do Estado, na qual se desenvolvem relações, interesses e formas de participação coletiva. Tal concepção é essencial para a compreensão do desenvolvimento sustentável, uma vez que atribui à sociedade civil a função de controle social, de pressão institucional e de fortalecimento da democracia, elementos indispensáveis à implementação de políticas sustentáveis.

No âmbito internacional, a Agenda 2030, instituída pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), reforça a necessidade de atuação conjunta entre Estado, setor privado e sociedade civil, evidenciando que a concretização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável depende de um modelo de governança colaborativa. Nesse cenário, a sociedade civil assume papel estratégico na promoção, acompanhamento e efetivação dessas diretrizes globais.

Dessa forma, o desenvolvimento sustentável revela-se como um processo complexo e interdependente, cuja efetividade está diretamente vinculada ao grau de engajamento da sociedade civil. Trata-se, portanto, de um modelo que exige não apenas a atuação institucional, mas, sobretudo, a participação consciente e ativa dos indivíduos e das organizações sociais, na construção de uma ordem social mais justa, equilibrada e sustentável.

Diante do exposto, evidencia-se que a sociedade civil não pode ser compreendida como mera espectadora das transformações sociais, mas como protagonista indispensável na construção de um modelo de desenvolvimento sustentável. Sua atuação revela-se essencial não apenas na formulação de demandas sociais, mas também na indução de práticas responsáveis, na fiscalização das políticas públicas e na consolidação de uma cultura orientada à sustentabilidade. Nesse sentido, a efetividade do desenvolvimento sustentável está diretamente condicionada ao grau de organização, consciência crítica e engajamento da sociedade civil, o que reforça a necessidade de aprofundar a análise acerca dos mecanismos concretos de participação social, por meio dos quais esse protagonismo se materializa na prática.

2.3. A PARTICIPAÇÃO SOCIAL COMO EIXO ESTRUTURANTE DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A consolidação do desenvolvimento sustentável exige a superação de paradigmas tradicionais centrados exclusivamente no crescimento econômico, demandando a incorporação de dimensões sociais e ambientais de forma integrada e sistemática. Nesse cenário, a sociedade civil assume papel estratégico, não apenas como agente de apoio, mas como verdadeiro vetor de transformação estrutural, atuando na construção de práticas sustentáveis, na fiscalização das ações estatais e na indução de comportamentos socialmente responsáveis.

A literatura especializada aponta que o desenvolvimento sustentável deve ser compreendido como um processo multidimensional, que articula crescimento econômico, equidade social e preservação ambiental. Nessa perspectiva, Sachs (2002) sustenta que a sustentabilidade pressupõe a harmonização entre tais dimensões, evidenciando a necessidade de uma atuação coordenada entre os diversos atores sociais. Tal compreensão afasta a ideia de desenvolvimento como mero avanço econômico, reposicionando-o como um fenômeno complexo e interdependente.

Corroborando essa abordagem, Veiga (2005) enfatiza que o desenvolvimento sustentável não constitui um estado estático, mas um processo contínuo de transformação, que envolve mudanças estruturais nos padrões de produção, consumo e organização social. Para o autor, a efetividade desse modelo depende da internalização de valores sustentáveis pela coletividade, o que reforça o protagonismo da sociedade civil como agente de mudança.

Sob o enfoque ético e civilizatório, Boff (2012) destaca que a sustentabilidade ultrapassa a dimensão técnica, configurando-se como um compromisso moral com a preservação das condições que sustentam a vida no planeta. Nesse contexto, a sociedade civil desempenha papel fundamental na construção de uma consciência ecológica, sendo responsável pela difusão de valores que orientem práticas responsáveis e solidárias.

No campo da teoria política, Bobbio (1982) compreende a sociedade civil como esfera autônoma de organização social, distinta do Estado, na qual se desenvolvem relações sociais, econômicas e culturais. Essa autonomia revela-se essencial para o fortalecimento da democracia e para o exercício do controle social, especialmente no que se refere à formulação e implementação de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento sustentável.

No plano internacional, a Agenda 2030, instituída pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), estabelece diretrizes globais voltadas à promoção do desenvolvimento sustentável, destacando a importância da atuação conjunta entre Estado, setor privado e sociedade civil. Tal orientação evidencia que a sustentabilidade não pode ser alcançada por iniciativas isoladas, mas exige um modelo de governança colaborativa, pautado na participação social e na corresponsabilidade.

Diante desse cenário, evidencia-se que a participação da sociedade civil não constitui elemento acessório, mas componente essencial para a efetivação do desenvolvimento sustentável. Trata-se de um processo que demanda engajamento coletivo, consciência crítica e atuação ativa dos diversos segmentos sociais, na construção de um modelo de desenvolvimento que concilie eficiência econômica, justiça social e equilíbrio ambiental.

Diante desse cenário, a participação social revela-se não apenas como instrumento auxiliar, mas como verdadeiro pilar estruturante do desenvolvimento sustentável, na medida em que viabiliza a efetivação de políticas públicas, fortalece os mecanismos de controle democrático e promove a internalização de valores socioambientais na coletividade. Trata-se de um processo que transcende a atuação institucional, exigindo o engajamento contínuo e consciente dos indivíduos e das organizações sociais na construção de soluções sustentáveis. Assim, a consolidação de um modelo de desenvolvimento equilibrado e duradouro depende, em última análise, da capacidade da sociedade de se organizar, participar e intervir de forma ativa nas decisões que impactam o presente e o futuro das próximas gerações.

2.4. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E JUSTIÇA SOCIAL: FUNDAMENTOS PARA UMA GOVERNANÇA INCLUSIVA

O desenvolvimento sustentável não pode ser compreendido de forma dissociada da justiça social, sob pena de se reduzir a um discurso meramente ambiental, esvaziado de efetividade transformadora. A literatura contemporânea evidencia que a sustentabilidade exige a superação das desigualdades estruturais, especialmente em contextos marcados por exclusão social e econômica. Nesse sentido, Amartya Sen (2010, p. 28) afirma que “o desenvolvimento pode ser visto como um processo de expansão das liberdades reais que

as pessoas desfrutam", o que evidencia que a sustentabilidade deve estar diretamente vinculada à ampliação das capacidades humanas e ao acesso equitativo a oportunidades.

Nessa mesma linha, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, ao publicar o Relatório Brundtland, consagrou a definição clássica de desenvolvimento sustentável como aquele que "atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades" (CMMAD, 1991, p. 46). Tal concepção introduz a dimensão intergeracional como elemento essencial, reforçando a necessidade de políticas públicas que conciliem crescimento econômico com responsabilidade social e ambiental.

Sob o enfoque sociológico, Beck (2011, p. 23) sustenta que a sociedade contemporânea vive sob a lógica da "sociedade de risco", na qual os impactos ambientais e sociais decorrentes do desenvolvimento industrial passam a atingir de forma generalizada a população, ainda que de maneira desigual. Essa constatação evidencia que os riscos ambientais não são apenas questões ecológicas, mas também profundamente sociais, exigindo respostas estruturais baseadas na equidade e na participação democrática.

No contexto latino-americano, Leff (2001, p. 57) destaca que a crise ambiental está intrinsecamente ligada às formas de racionalidade econômica predominantes, defendendo a necessidade de construção de uma nova racionalidade ambiental, capaz de integrar saberes sociais, culturais e ecológicos. Para o autor, a sustentabilidade somente se concretiza mediante a transformação dos modelos de produção e consumo, com a valorização dos conhecimentos locais e da diversidade sociocultural.

Diante desse quadro, verifica-se que o desenvolvimento sustentável exige uma abordagem que vá além da preservação ambiental, incorporando a justiça social como elemento central de sua estrutura. A construção de uma governança inclusiva, pautada na equidade, na participação social e na responsabilidade intergeracional, revela-se condição indispensável para a efetividade das políticas sustentáveis, consolidando um modelo de desenvolvimento verdadeiramente comprometido com a dignidade humana e a proteção do planeta.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

À luz das análises desenvolvidas, verifica-se que o desenvolvimento sustentável constitui um processo histórico, dinâmico e multidimensional, cuja consolidação decorre da crescente conscientização acerca dos limites ambientais e da necessidade de reorganização dos modelos de produção e consumo. Conforme demonstrado ao longo do estudo, a construção desse conceito não ocorreu de forma linear, sendo resultado de debates internacionais, conferências globais e da progressiva percepção de que os impactos ambientais ultrapassam fronteiras territoriais, exigindo respostas coordenadas em escala mundial.

Nesse contexto, a evolução das discussões internacionais, desde a Conferência de Estocolmo até a Agenda 2030, evidencia a tentativa de harmonizar crescimento econômico com preservação ambiental e justiça social, ainda que persistam desafios significativos quanto à efetividade das medidas propostas. A institucionalização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável representa um avanço relevante, ao estabelecer metas globais que orientam a atuação dos Estados, das organizações e da sociedade civil, reforçando a ideia de corresponsabilidade na construção de um futuro sustentável.

Ademais, restou evidenciado que a sociedade civil ocupa posição central nesse processo, não apenas como destinatária das políticas públicas, mas como agente ativo na sua formulação, fiscalização e implementação. A literatura analisada demonstra que a sustentabilidade não pode ser alcançada sem a participação social efetiva, uma vez que a transformação dos padrões de consumo, a internalização de valores socioambientais e o controle democrático das ações estatais dependem diretamente do engajamento coletivo.

Sob essa perspectiva, a participação social revela-se elemento estruturante do desenvolvimento sustentável, na medida em que fortalece os mecanismos de governança, amplia a legitimidade das decisões públicas e contribui para a construção de soluções mais inclusivas e eficazes. Tal constatação reforça a compreensão de que a sustentabilidade não se limita à dimensão ambiental, mas incorpora, de forma indissociável, aspectos sociais, econômicos e políticos.

Por fim, conclui-se que, embora avanços normativos e institucionais tenham sido alcançados, a efetividade do desenvolvimento sustentável ainda enfrenta obstáculos relacionados à sua implementação prática, especialmente diante de interesses econômicos e desigualdades estruturais. Assim, a consolidação desse modelo depende do fortalecimento da atuação da sociedade civil, da ampliação da cooperação internacional e da adoção de políticas públicas comprometidas com a equidade intergeracional, de modo a assegurar não apenas a preservação dos recursos naturais, mas também a dignidade e a qualidade de vida da presente e futuras gerações.

REFERÊNCIAS

[1] Amartya Sen. **Desenvolvimento como liberdade**. São Paulo: Companhia das Letras, 2010.

[2] BECK, Ulrich. **Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade**. São Paulo: Editora 34, 2011.

[3] BOBBIO, Norberto. **O conceito de sociedade civil.** Rio de Janeiro: Graal, 1982.

[4] BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: o que é – o que não é**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2012.

[5] BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade O que é – O que não é.** Petropolis, RJ: Vozes, 2016.

[6] CHIAVENATO, Idalberto. **Princípios da administração**. Barueri, SP: Manole, 2012.

[7] CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro, RJ: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

[8] DRUCKER, Peter. **Tecnologia, administração e sociedade**. São Paulo: SP, Campus.

[9] LEFF, Enrique. **Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder.** Petrópolis, RJ: Vozes, 2001.

[10] ITAMARATY. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).** Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods> Acesso em: 3 de maio de 2019.

[11] ITAMARATY. **17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).** Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/20160119-ODS.pdf> Acesso em: 13 de outubro de 2019.

[12] NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do. **Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico,** Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v26n74/a05v26n74.pdf> Acesso em : 27 de abril de 2019

[13] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/brasil_amigo_pesso_idosa/agenda2030.pdf. Acesso em : 27 de abril de 2019

[14] PEÑAFIEL, Adriana; RADOMSKY, Guilherme. **Desenvolvimento e Sustentabilidade**. Curitiba, PR: Intersaberes, 2013.

[15] RODRIGUES, Alessandra Aparecida Berton; BUCZENKO, Gerson Luiz; PSCHEIDT, Kristian Rodrigo. **Objetivos Sustentáveis: educação ambiental e crítica**. Campo Largo, PR: E-book, 2019.

[16] ONU. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/brasil_amigo_pesso_idosa/agenda2030.pdf**.** Acesso em: 27 de abril de 2019

[17] ROMA, Júlio César. **Os objetivos de desenvolvimento do milênio e sua transição para os objetivos de desenvolvimento sustentável.** Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252019000100011> Acesso em: 15 de maio de 2019.

[18] SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

[19] VEIGA, José Eli da. **Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI.** Rio de Janeiro: Garamond, 2005.

[20] SEN, Amartya. **Desenvolvimento como liberdade.** São Paulo: Companhia das Letras, 2010.

Capítulo 2

Ressignificação dos resíduos agroindustriais oriundos da cana-de-açúcar em insumos circulares e subprodutos

Beatriz Rodrigues de Lima
Joelise de Alencar Figueira Angelotti

Resumo: Um dos pilares da economia brasileira se concentra nas atividades desempenhadas pelo agronegócio, representando 23,8% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, conforme os dados de 2022 e 2023, mensurados pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), da Esalq/USP, em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo e na safra 2020/2021, respondeu por aproximadamente 23% da produção e por 51,3% do comércio global do produto. A produção anual de cana-de-açúcar fica em torno de 500 milhões de toneladas e esse amplo volume de matéria-prima impulsiona significativamente o setor sucroalcooleiro, contribuindo de forma substancial para a alavancagem da economia do país. Devido aos números expressivos e o peso econômico latente, altos investimentos em avanços científicos são feitos nessa área, visando a melhoraria do rendimento da área produtiva e seus processos. Com o advento dessas novas perspectivas tecnológicas, surge um processo produtivo em escala industrial baseado na fermentação de leveduras e subprodutos da cana-de-açúcar. Esse processo gera inúmeros resíduos que são muitas vezes descartados e desconsiderados, resultando em desperdícios de diversas categorias e naturezas. Visto isso, o presente trabalho teve como objetivo evidenciar a relevância da cana-de-açúcar na economia interna do país por meio agronegócio, abordar as técnicas e aplicações biotecnológicas inseridas ao longo de toda cadeia produtiva em uma indústria sucroalcooleira e alimentícia, buscando identificar resíduos agroindústrias com alto potencial de reaproveitamento e ressignificação para produção de insumos circulares e obtenção de novos produtos.

Palavras-chaves: agronegócio, biotecnologia, gestão de resíduos, subprodutos, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil sempre foi um país marcado por sua abundante biodiversidade e características intrínsecas relacionadas ao cultivo e atividades agrícolas. Em 1950, grande parte dos brasileiros residia nas áreas rurais, representando 63,8% do total da população. Após vinte anos, entre as décadas de 1950 e 1970, o país teve uma das maiores migrações rural-urbanas de sua história, o qual alavancou o início de uma nova era econômica nacional (Alves et al., 2011).

À vista de um mercado promissor e o crescente avanço do agronegócio brasileiro, este se tornou um importante pilar econômico, político e social tanto para o próprio país quanto perante o mercado mundial. O Brasil é reconhecido como "o celeiro do mundo" e exerce a liderança nas produções e exportações globais de pelo menos sete alimentos, graças às suas condições favoráveis relacionadas ao clima, solo fértil, posição geográfica, o que contribui para o crescimento econômico (Medina, 2022). Dentre as principais commodities produzidas e exportadas pelo Brasil, a cana-de-açúcar se destaca. Caracterizada por ser uma planta versátil com inúmeras aplicabilidades, a cana-de-açúcar despertou interesse industrial, em decorrência de produtos economicamente valorosos como o açúcar, etanol e energia, e por isso, o setor sucroenergético foi consolidado no país (Prasad 69 et al., 2022).

Reconhecido como o maior produtor mundial de açúcar e mencionado pelo Instituto de Economia Agrícola como sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, na safra 2020/2021 o país produziu 654,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar destinados à produção de 41,2 milhões de toneladas de açúcar e 29,7 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2023).

Em vista de um mercado altamente rentável e promissor, investimentos e estudos foram aplicados para obtenção de subprodutos e resíduos agroindustriais do processamento da cana, uma vez que praticamente todos elementos e fragmentos que compõe a cana-de-açúcar podem ser transformados (Ravindran; Jaiswal, 2016). No que tange em um aproveitamento cada vez mais inteligente e limpo dos componentes canaviais, o robusto setor sucroenergético brasileiro já vem crescendo de forma exponencial em decorrência da aplicação de métodos e técnicas biotecnológicas ao longo da cadeia produtiva (Medina, 2022). Segundo a estimativa feita pela Lallemand Biofuels & Distilled Spirits (LBDS), a qual atua no setor biotecnológico para etanol, diz que a utilização de leveduras proporciona o aumento da produtividade do combustível, enriquecendo as receitas das usinas canavieiras do Brasil em até US$ 250 milhões (R$ 1 bilhão). De acordo com a companhia, através da engenharia genética no setor a quantidade de áreas para plantação é reduzida, diminuindo a pegada de carbono do setor (Grandis et al., 2024).

Com o objetivo de agregar valor ao que seria descartado, o bagaço, a vinhaça, biopolímero, as cinzas das caldeiras e as leveduras são exemplos de resíduos agroindustriais explorados como novas vias de rentabilidade lucrativa (Cacuro; Waldman 2015). A partir desses resíduos é possível a obtenção de novos produtos economicamente interessantes e com impacto ambiental menor como a produção de etanol de segunda geração, cogeração energética e obtenção de insumos alimentícios (Prasad et al., 2022).

Visto que o setor tem crescido, e os estudos na área tem aumentado, torna-se necessário sintetizar o conhecimento existente a respeito da aplicabilidade da biotecnologia nos processamentos da cana-de-açúcar buscando relatar através da literatura, possíveis resíduos agroindustriais e componentes interessantes economicamente com expressivo potencial de transformação em insumos circulares ou até mesmo em novos produtos.

Diante do exposto, objetivou-se identificar, através da revisão narrativa da literatura, os resíduos agroindústrias oriundos do processamento da cana-de-açúcar com potencial de se transformarem em novos produtos. Além disso, buscou evidenciar e destacar a importância da aplicação biotecnológica nos processos bem como seu impacto no agronegócio - mais especificamente no processamento da cana-de-açúcar - e como essa relação favorece a economia circular industrial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica narrativa da literatura com abordagem do tema da ressignificação dos resíduos agroindustriais oriundos do processamento da cana-de-açúcar por meio da aplicação de métodos biotecnológicos.

Para a síntese dessa revisão narrativa, as informações e pesquisas foram feitas a partir de periódicos científicos partindo de artigos, revistas e sites acadêmicos como Periodicos Capes, Google Acadêmico, PubMed e ScienceDirect. Também foram coletadas informações de fontes secundárias em websites para síntese de contextualização de números referente aos períodos econômico e histórico, tais como, Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA, BAYER, EMBRAPA, Confederação da Agricultura e Pecuária do Bras - CNA, Associação Brasileira do Agronegócio - ABAG, Banco BTG Pactual S.A - BTG e União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia - UNICA.

Os termos pesquisados para realização da revisão foram: açúcar, açúcar fermentescível, bagaço, biocombustível, bioenergia, bioprocesso, biotecnologia, cana-de-açúcar, ciência alimentar, creme de levedura, economia circular, etanol, extrato de levedura, fermentação, fermentação alcólica, levedura, levedura alimentar, *Saccharomyces cerevisiae*. Os termos de pesquisa foram combinados com os operadores booleanos para encontrar os resultados desejados. Todos esses termos foram pesquisados em português e também traduzidos e buscados na língua inglesa. No entanto, mesmo os buscadores estando em português/inglês, a busca retornou com a captura de artigos em outras línguas como em espanhol, os quais também foram aceitos no processo de avaliação e síntese do trabalho.

Foram encontrados mais de 300 artigos relacionados ao tema e selecionados 82 artigos. Como critério de inclusão foi considerado os artigos publicados nas línguas português, espanhol e inglês e o fator tempo não foi um critério de exclusão durante a busca obtendo artigos de 1958 até 2024. A busca inicial foi realizada a leitura dos títulos e resumos em busca de artigos que apresentassem informações relevantes sobre o tema. Após esse rastreio inicial os artigos selecionados foram lidos na íntegra e escolhidos àqueles com informações pertinentes relacionados ao setor sucroalcooleiro, obtenção de insumos alimentícios a partir de resíduos agroindustriais, métodos de fermentação e processos industriais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Contexto geral

A fusão dos conceitos de agricultura e suas aplicações em toda cadeia produtiva agrícola ou pecuária, somadas ao conceito de negócio, veio a definir de fato o que seria o agronegócio. A primeira constatação do termo agronegócio adveio do conceito de agribusiness (agriculture + business), formulada na década de 1940, na Universidade de Harvard, Estados Unidos, a partir da obra "A Concept of Agribusiness", de autoria de John Davis e Ray Goldberg (Sheridan, 1958).

No Brasil, a nomenclatura do agronegócio veio a ser incorporado na década de 1950, mesmo período em que houve as primeiras instalações das indústrias em base nacional, o que possibilitou a internalização das unidades de fabricação de máquinas e equipamentos agrícolas, favorecendo o avanço da industrialização do país (*draft industrialization*). Desde então, o desenvolvimento do agronegócio brasileiro vem ganhando destaque e relevância no mercado nacional e internacional (Alves et al., 2008). Nos últimos 50 anos, houve um crescimento significativo na agricultura do Brasil, tornando o país líder mundial nesse setor, além da adoção de formas de agricultura com manejos mais sustentáveis em comparação aos demais países, em vista dos avanços de industrialização e também sobre as condições climáticas e de vegetação favoráveis que o Brasil possui (Buainain et al., 2019).

O estado de São Paulo se destaca sendo o principal produtor de cana-de-açucar por estar localizado em uma região com condições favoráveis de solo e clima, adequada infraestrutura de transportes, proximidade dos mercados consumidores e uma grande base de desenvolvimento científico e tecnológico (Duarte et al., 2013). Um exemplo prático são as indústrias sucroalcooleiras, localizadas no interior de São Paulo, essas indústrias comportam desde as áreas cultivadas de cana-de-açúcar como o setor agrícola e usina sucroalcooleira, ou seja, desempenha tanto atividades para obtenção de etanol como de açúcar e por fim uma indústria alimentícia que reutilizam alguns resíduos oriundos dos processos das áreas produtivas anteriores em insumos alimentícios para humanos e animais (Ogura et al., 2022).

Segundo dados da Investe Sp, representando cerca de 60% do PIB da região sudeste e aproximadamente um terço da economia brasileira**,** esse rico estado conhecido como "o coração do Brasil", é responsável por mais de 50% da produção de cana-de-açúcar. No setor sucroenergético, o país possui uma imponente visibilidade mundial, representando um mercado em constante expansão tanto na produção de açúcar, como de biocombustível etanol (Corrêa, 2023).

Cana-de-açúcar e seus produtos

A *Saccharum officinarum*, popularmente conhecida como cana-de-açúcar, é uma espécie de gramínea do gênero *Saccharum* e pertence à família Poaceae, a mesma de outras gramíneas como o arroz, o milho e a cevada. Já em sua estrutura caulinar se encontra uma fonte riquíssima em sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$), sendo, portanto, a principal matéria-prima na produção de açúcar, um elemento importante na alimentação humana, tanto pelo fator culinário quanto como fonte de energia nas funções físicas e mentais (Moore; Botha, 2013).

Quanto aos constituintes químicos, a cana-de-açúcar é rica principalmente em celulose, hemicelulose, lignina e pentosana. O caldo produzido por ela se trata de uma solução impura de sacarose diluída, constituída por 75% a 82% de água e outros compostos sólidos totais solúveis entre 18 a 25%. Dentre esses sólidos solúveis estão presentes

os açúcares como a sacarose nas quantidades de 14,5 a 23,5%; glucose de 0,2 a 1,0% e a frutose chegando até 0,5%, e os não- açúcares orgânicos de 0,8 a 1,5% e inorgânicos entre 0,2 a 0,7%. As condições de cultivo determinam as variedades de cana obtidas, bem como a composição química de cada planta (Prasad et al., 2022).

Também compõe o caldo as substâncias nitrogenadas, como proteínas e aminoácidos, gorduras, ceras, pectinas, ácidos e materiais corantes (clorofila, sacarina e antocianinas). Em relação aos compostos das cinzas, os principais são sílica, potássio, fósforo, cálcio, sódio, magnésio, enxofre, alumínio, entre outros (Palma et al., 2021).

A cana-de-açúcar se trata de uma planta extremamente rica com inúmeras utilidades em diversos setores do agronegócio brasileiro. Sendo fonte de matéria-prima de diversos processos, a cana se tornou um recurso primordial para composição de uma extensa gama de produtos e subprodutos como: açúcar, álcool (etanol), adubo orgânico, vinhaça, geração de energia, cinzas, bagaço, levedura e polímeros (Prasad et al., 2022).

A obtenção de tamanha gama de produtos de origem canavieira, advém de processos e operações unitárias importantes para estruturação de toda cadeia produtiva. Existem processos necessários para extrair os benefícios que a cana traz e suas transformações para a síntese de uma nova linha de produtos, sejam primários, secundários ou aqueles que são oriundos dos resíduos dos processos anteriores. Em decorrência dessas transformações e formas de obtenção de outros produtos de maneira significativa, houve o fortalecimento e o impulsionamento para o crescimento do setor sucroalcooleiro brasileiro (Ramos, 2007).

O açúcar, especificamente a sacarose, desempenha um papel importante no processamento de indústrias alimentícias, além de avaliar o impacto na economia global. Extraído principalmente da cana-de-açúcar e da beterraba, o açúcar não só é um dos ingredientes mais utilizados em produtos alimentícios, como também tem importância significativa na produção de biocombustíveis e na indústria farmacêutica. A sacarose é valorizada por suas propriedades funcionais, que incluem a capacidade de adoçar, preservar e melhorar a textura dos alimentos (Ferreira et al., 2009).

O biocombustível etanol advindo da cana-de-açúcar desempenha um papel crucial para o alcance de uma cultura global mais sustentável e limpa, através da redução de emissões de gases do efeito estufa (Goldemberg, 2007). Considerado como biocombustível com a menor pegada de carbono do mundo, uma pesquisa realizada pela Embrapa, mencionou que ao substituir a gasolina, o “combustível verde” reduziu em pelo menos 73% as emissões de gás carbônico (CO_2), o qual é o principal causador do efeito estufa e consequentemente, das drásticas influências diretas sobre o aquecimento global. Essa baixa pegada de carbono também melhorou a qualidade do ar em São Paulo, a quarta cidade mais populosa do mundo, atendendo aos padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (Grandis et al., 2024).

O processo de obtenção do etanol inicia-se com a extração do caldo de cana-de-açúcar, uma solução rica em sacarose, obtida através de moendas. Para a produção de etanol, o caldo passa por tratamento para eliminar bagacilho e impurezas, ajustar o pH, reduzir a taxa de cálcio e a carga bacteriana, preservando nutrientes essenciais (Canilha et al., 2012).

O melaço, um subproduto denso e escuro obtido após a evaporação e cozimento do caldo clarificado, é fermentado pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, transformando açúcares em etanol e gás carbônico. As leveduras industriais possuem características específicas como velocidade de fermentação, tolerância ao álcool, rendimento e resistência a condições adversas (Okoye et al., 2017).

A preparação do mosto, composto por açúcares, vitaminas e minerais, é essencial para a fermentação alcoólica. Após a inoculação do fermento, a mistura de mosto e fermento é conduzida às dornas de fermentação, onde ocorre a conversão dos açúcares em álcool e CO_2. O processo é dividido em fermentação preliminar, principal e pós-fermentação, caracterizadas por diferentes níveis de atividade fermentativa (Ceccato-Antonini, 2022).

O mosto resfriado é enviado às destilarias, onde é aquecido para evaporar o etanol. Na condensação, obtém-se etanol com mais de 95% de pureza. O etanol hidratado, contendo 7,5% de água, é utilizado como combustível, emitindo até 90% menos CO_2 comparado à gasolina. O etanol anidro, com apenas 0,7% de água, é misturado em 27% à gasolina tipo C, melhorando a octanagem e reduzindo as emissões de gases poluentes (Uddin et al., 2025).

Dessa forma a biotecnologia desempenha um papel crucial na produção de etanol, otimizando processos e tornando-os mais sustentáveis. Um exemplo disso são os microrganismos especialmente projetados para maximizar a produção de etanol por meio de cepas otimizadas. Esses microrganismos modificados que apresentam maiores rendimentos e características benéficas ao processo são inovações oriundas de pesquisas biotecnológicas (Joshi et al., 2022). Eles são capazes de fermentar açúcares presentes no caldo extraído da cana-de-açúcar, contribuindo para a produção eficiente de etanol. A eficiência de conversão dos açúcares em etanol por *Saccharomyces cerevisiae* geralmente varia entre 90% e 95% do rendimento teórico máximo, dependendo das condições de fermentação e da cepa utilizada. Em processos industriais, as concentrações de etanol produzidas podem variar, mas a eficiência na conversão de açúcares em etanol permanece alta. As cepas otimizadas podem alcançar conversões muito próximas do máximo teórico estipulado (Ceccato-Antonini, 2022).

Além desses, existem os microrganismos que atuam como agentes da biorremediação, através da remoção de metais tóxicos do ambiente e prejudiciais, contribuindo assim, para a sustentabilidade e bem-estar ambiental (Eliodório et al., 2023). Nascimento et al. (2019), confirmam a eficácia da levedura *Saccharomyces cerevisiae* em remover 76% do Cu (II), demonstrando sua efetividade como biorremediador.

Resíduos agroindustriais do setor sucroalcooleiro: potencial e aplicações biotecnológicas

A biotecnologia tem sido crucial para o avanço do agronegócio moderno, contribuindo para maiores produtividades e lucratividade, como visto anteriormente. No setor alimentício, ela aprimora a eficiência da cadeia produtiva, assegura a qualidade dos produtos e proporciona uma biomassa e matéria-prima de melhor consistência (Prasad et al., 2022). A cana-de-açúcar, por exemplo, está amplamente associada aos processos biotecnológicos, sendo a base da produção nas indústrias sucroalcooleiras. Essas indústrias aplicam biotecnologia desde a modificação genética das sementes até os processos fabris, resultando em produtos mais saudáveis, seguros e de maior qualidade (Nepomuceno et al., 2007).

A fermentação é um dos principais métodos biotecnológicos utilizados na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, gerando diferentes produtos com relevância econômica (Okoye et al., 2017). Além disso, o setor se destaca pela geração de resíduos comercialmente interessantes, como bagaço, vinhaça e levedura, que são reaproveitados através de técnicas biotecnológicas que sintetizam subprodutos com alto potencial mercadológico promovendo assim uma economia circular e sustentável, e valorizando o que antes seria descartado (Grandis et al., 2024). Esse reaproveitamento oferece novas oportunidades para a criação de bioprodutos, diversificando a oferta de insumos para agricultores e agroindústrias, enquanto responde às demandas ambientais por produtos naturais e biodegradáveis. A aplicação de técnicas biotecnológicas permite transformar resíduos em subprodutos como biocombustíveis, bioenergia e outros compostos de valor industrial (Bezerra; Ragauskas 2016).

Bagaço

O bagaço se trata de um resíduo canavieiro fibroso e sua obtenção ocorre após a extração da cana-de-açúcar por moendas. No Brasil, esse resíduo é o mais abundante entre os subprodutos agroindustriais canavieiros, com uma produção aproximada de 280 kg para cada tonelada de cana- de-açúcar moída. A cada ano estima-se que sejam produzidas entre 5 e 12 milhões de toneladas desse material, o que representa cerca de 30% do total da cana processada (Prasad et al., 2022).

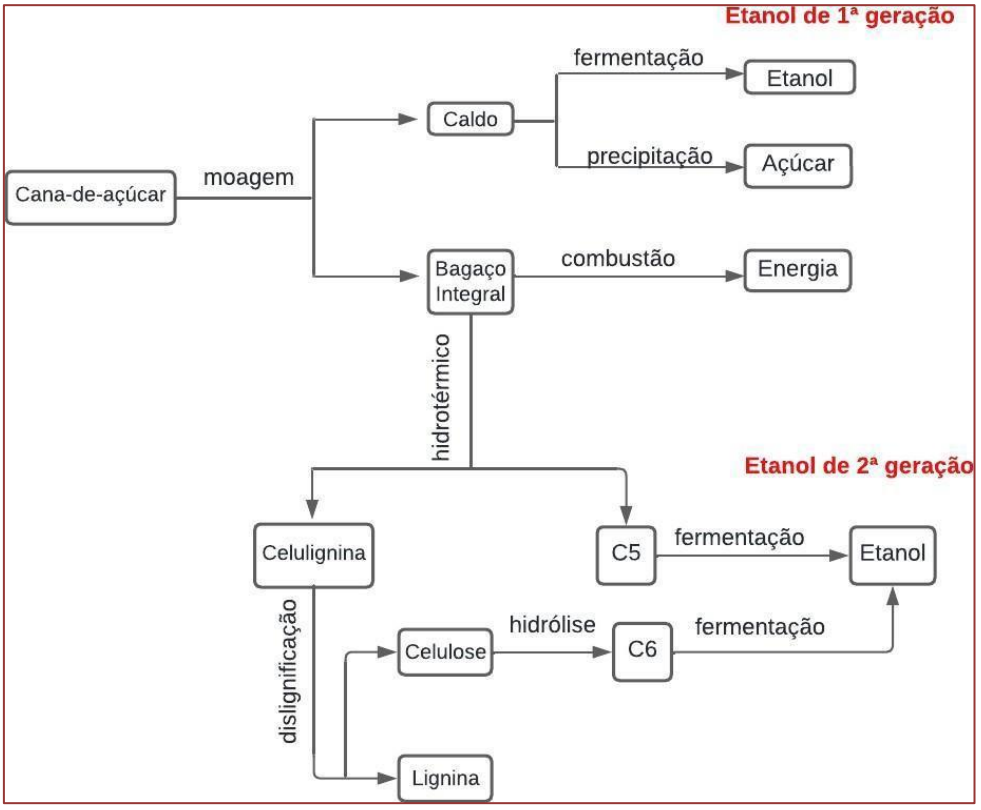
Esse material residual, antes considerado rejeito, passou a ser amplamente aproveitado, especialmente na geração de bioenergia, obtenção de biogás, produção de papel e celulose, alimentação animal, produção de açúcar e álcool, como já mencionado anteriormente, além do melhoramento e remediação do solo para atividades agrícolas que contribuem para economia circular e a sustentabilidade. Com os avanços tecnológicos e em pesquisas biotecnológicas, o reaproveitamento e ressignificação deram origem ao etanol de segunda geração, bioeletricidade e alimentação animal (Cortez et al., 1992).

Biotecnologia Ambiental na Produção de Etanol de Segunda Geração: Aproveitamento da Biomassa

Partindo do pressuposto de que a biotecnologia ambiental se trata de uma vertente da biologia focada em aplicações distintas para prevenir, remediar ou resolver problemas que impactem negativamente o meio ambiente, assim, tem como um de seus objetivos a promoção de processos e manejos que contribuam para a sustentabilidade e equilíbrio do ecossistema do planeta (Grandis et al., 2024).

A aplicação da biotecnologia ambiental no setor de combustíveis do tipo etanol, também teve relevante participação na obtenção do etanol de segunda geração ou também chamado de bioetanol, a partir da conversão da biomassa lignocelulósica, como o bagaço de cana, que normalmente seria descartado (Chandel et al., 2018). Com os avanços da biotecnologia e inovações tecnológicas a produção dessa linha de biocombustível tende a ser cada vez mais eficiente e sustentável. O etanol de segunda geração, também chamado de etanol celulósico, provém da biomassa lignocelulósica, adquirida a partir dos subprodutos da produção de etanol e açúcar, como a palha e o bagaço da cana-de-açúcar (Figura 1) (Joshi et al., 2022).

Figura 1. Produção de etanol de segunda geração.



Quando o etanol é produzido, parte da matéria-prima usada no processo, como bagaço e palha, não é completamente convertida em etanol e fica retida nesses resíduos. À medida que a produção de etanol celulósico aumenta, a eficiência desse processo também melhora. Isso significa que, com a mesma quantidade de terra, você pode produzir até 50% mais biocombustível do que antes. Isso ocorre porque o etanol celulósico permite aproveitar melhor os resíduos que antes eram menos utilizados, resultando em um aumento significativo na produção de biocombustível (Broda et al., 2022).

Até o momento, a conversão do bagaço de cana-de-açúcar em bioetanol tem sido desafiada pela viabilidade econômica e pelos altos custos envolvidos, o que tem dificultado a sua aplicação em larga escala. No entanto, foram iniciadas estratégias biotecnológicas promissoras para integrar a produção de bioetanol com a fabricação de produtos químicos biológicos, com o objetivo de reduzir os custos de produção (Quintero et al., 2013; Kawaguchi et al., 2016).

Além disso, com a biotecnologia presente no desenvolvimento de métodos e tecnologias de pré-tratamento organosolv (técnica de polpação que usa um solvente orgânico para solubilizar a lignina e a hemicelulose), assistidos por irradiação de micro-ondas ou ultrassom, demonstrou que é possível realizar a hidrólise e a liberação de quantidades adequadas de açúcares fermentescíveis sem a presença de inibidores e obtendo quantidades significativas de produtos químicos de valor agregado durante a despolimerização da lignina (Zhou et al., 2018).

Assim, a evolução planejada da levedura *Saccharomyces cerevisiae* para melhorar a fermentação pode ser alcançada através da eliminação de genes que inibem o processo de fermentação, superexpressão das vias metabólicas para a fermentação dos açúcares glicose, xilose e arabinose, e aumento da tolerância aos inibidores, o que pode viabilizar a produção comercial de bioetanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar (Bezerra; Ragauskas 2016; Khattab; Watanabe, 2019).

Bagaço de Cana: Transformando Resíduos em Bioenergia

No Brasil, a principal fonte de biomassa para a geração de energia elétrica atualmente provém da cana-de-açúcar, cultivada e processada principalmente nas regiões Sudeste e Centro- Oeste (Ministério de Minas e Energia, 2020).

A cultura de bioenergia ou também chamada de agroenergia, surge a partir de resíduos vegetais por meio de duas vertentes que constituem biomateriais sustentáveis de baixo custo e mais promissores para geração de biocombustíveis e energia (Bezerra; Ragauskas 2016). O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto encontrado em abundância no setor sucroenergético e por isso recebeu grande relevância no país, se destacando por ser uma biomassa com importante desempenho energético e se tornando, portanto, uma via fonte de energia renovável (Dantas et al., 2013).

O bagaço de cana é frequentemente utilizado como fonte de combustível e para cogeração de energia, uma vez que este possui a capacidade de prover tanto energia quanto calor suficientes para o sistema (Uddin et al., 2025). A cogeração elétrica é obtida por meio da reação de queima do bagaço em caldeiras que geram vapor e eletricidade. Esse vapor é usado para geração e obtenção de energia elétrica e calor, devido a aplicações biotecnológicas relacionadas com a utilização de leveduras e microrganismos geneticamente modificados, otimização de enzimas e biocatalizadores, aproveitamento de CO_2 e biogás, além de obtenção de geração de energia elétrica simultânea contribuindo para obtenção de bioenergia. Cada uma dessas aplicações biotecnológicas promovem a melhoria e eficiência contínua dos processos (Prasad et al., 2022).

Frequentemente, as sucroalcooleiras produzem um excedente de bagaço, que pode causar danos ambientais devido ao seu tempo de vida útil (acúmulo prolongado), representando um risco de combustão espontânea. No Brasil, as usinas geram em média 12 kWh de eletricidade, 330 kWh de energia térmica e 16 kWh de energia mecânica por tonelada de bagaço de cana (Bezerra; Ragauskas 2016). Os sistemas de cogeração de energia são amplamente utilizados no setor sucroenergético, isso significa que abrange tanto usinas açucareiras quanto destilarias de combustíveis etanol. Esse sistema fornece energia de maneira síncrona tanto para linha de produção de etanol de primeira geração quanto para o etanol de segunda geração, distinguindo apenas as pressões das caldeiras (2,2–9,0 MPa), demonstrando que o sistema utilizando 2,2 MPa alcançou o rendimento máximo de produção de etanol anidro de 113,7 litros por tonelada de cana-de-açúcar. Esse estudo evidencia os benefícios impactantes na sustentabilidade e na economia circular que a bioenergia fornece (Grandis et al., 2024).

Qualquer resíduo disponível dos processos de cana como o biocombustível lignocelulósico, é utilizado para a geração de eletricidade também (Cherubini; Strømman, 2011). Dessa forma, a economia circular é favorecida tornando as usinas do setor canavieiro autossuficientes e sustentáveis em termos de consumo de energia (Seabra; Macedo, 2011).

Bagaço de cana na alimentação animal

Por ser um resíduo em abundância no setor sucroenergético e de baixo custo, o bagaço de cana-de-açúcar está contemplado em várias pesquisas e estudos para ressignificação e obtenção de novos produtos de maneira mais sustentável. Devido à sua alta disponibilidade, especialmente em países produtores de cana, como o Brasil, este resíduo agroindustrial é uma alternativa economicamente viável para complementação da dieta de animais de criação como os ruminantes (Tavares et al., 2021).

Mesmo sendo rico em fibras, o bagaço não é uma opção saudável e nutritiva, já que apresenta teores baixos tanto de proteínas quanto de carboidratos solúveis, componentes básicos para constituição de uma boa alimentação (Konde et al., 2021). Dessa forma, a implantação de métodos biotecnológicos e bioprocessos como pré-tratamento, fermentação, produção de enzimas e adição de probióticos, os quais servem como estratégias de tratamento e suplementação para melhorar a digestibilidade, elevando assim o valor nutricional dos insumos alimentícios oriundos do bagaço de cana (Leme et al., 2003).

O bagaço de cana é composto por uma concentração elevada de lignina e celulose, componentes de baixa digestibilidade, principalmente se estiverem in natura. Devido a essas propriedades, a utilização do bagaço de cana na alimentação animal fica ineficiente, já que apresenta baixo valor energético e proteico (Konde et al., 2021). Estudos apontam que o uso exclusivo de bagaço de cana pode resultar em perda de peso ou em ganho de peso insuficiente em ruminantes, necessitando, portanto, de tratamento prévio ou associação com outros ingredientes mais nutritivos (Tavares et al., 2021).

Diversas técnicas têm sido desenvolvidas para melhorar a digestibilidade do bagaço de cana, como a amonização, ensilagem e tratamento com fungos ligninolíticos. A amonização, por exemplo, tem se mostrado eficaz na quebra das ligações lignocelulósicas, aumentando a disponibilidade de nutrientes e melhorando a digestibilidade da fibra (Carvalho et al., 2006).

Outro método promissor é o tratamento biológico, utilizando fungos que degradam a lignina, tornando os carboidratos mais acessíveis para a digestão animal. Essas práticas têm permitido um uso mais eficiente do bagaço na alimentação animal, ampliando seu potencial como recurso alimentar (Missio et al., 2016).

A utilização do bagaço de cana na alimentação animal também possui um importante impacto ambiental e econômico. A utilização do bagaço de cana pode reduzir os custos de alimentação animal, já que ele é um subproduto abundante e de baixo custo que pode ser inserido na dieta. Uma dieta balanceada seria composta por 65 a 70% de matéria seca, o que corresponderia a 30 a 35% de umidade. Quando se utiliza bagaço de cana como volumoso, a dieta pode ter cerca de 80% de matéria seca, levando a uma redução no consumo pelo animal. Estudos mostram que a inclusão de bagaço de cana na dieta de ruminantes pode diminuir significativamente o custo total da alimentação em até 20% a 30% em regiões onde a cana é amplamente produzida (Jin et al., 2023).

Dessa forma, a agregação de valor ao bagaço gera benefícios econômicos interessantes ao transformar um resíduo agroindustrial em um insumo útil e rentável, diminuindo a necessidade do consumo de rações convencionais. Em parâmetros ambientais, esse resíduo canavieiro contribui para a diminuição de emissões de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que este evita o descarte e a decomposição do bagaço, que liberaria metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).Outro levantamento relevante sobre as

vantagens no meio ambiente, está relacionado com a redução de pegadas de carbono de 10% a 15%, dependendo da escala e da eficiência do processo (Katakojwala et al., 2019).

Embora o bagaço de cana tenha grande potencial como componente da dieta animal, desafios ainda persistem, como a necessidade de tecnologias de processamento que tornem seu uso mais eficiente e economicamente viável. Pesquisas futuras devem focar na otimização dos tratamentos existentes e na descoberta de novas técnicas que possam aumentar ainda mais o valor nutritivo do bagaço. Além disso, é crucial avaliar os impactos a longo prazo do uso do bagaço na saúde e no desempenho dos animais, garantindo que essa prática seja segura e sustentável (Azadeh et al., 2024).

Vinhaça e seus subprodutos

A vinhaça ou vinhoto, trata-se de um resíduo líquido oriundo do vinho fermentado nas dornas e é gerado em grandes quantidades durante o processo de obtenção do etanol a partir da cana-de-açúcar (Christofoletti et al., 2013). Em questões proporcionais, para cada litro de etanol produzido, são gerados de 10 a 15 litros de vinhaça, o que a torna um dos principais resíduos da indústria sucroalcooleira (Moraes et al., 2014). Embora a vinhaça tenha um alto potencial poluente, devido à sua elevada carga orgânica e concentração de nutrientes, estudos apontam a utilização desse resíduo na agricultura como fertilizantes e como fonte de energia renovável, contribuindo para a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro (Grandis et al., 2024).

Por ser uma importante fonte de potássio para o plantio da cana-de-açúcar, a vinhaça age como um substituto completo ou parcial da adubação mineral. Comparada com o bagaço e a torta de filtro, a vinhaça é o resíduo orgânico mais rico em nutrientes, principalmente em potássio, entrando, na sua composição, também cálcio, magnésio, fósforo, manganês e nitrogênio orgânico, além de conter matéria orgânica que tem a capacidade de melhorar as propriedades do solo (Silva et al., 2014).

No entanto, sua composição química pode ter variação de acordo com o tipo de processo de fermentação e destilação utilizado, além das variedades de cana-de-açúcar processada (Menezes et al., 2013). A alta concentração de potássio na vinhaça é especificamente direcionada para o uso agrícola, pois pode substituir fertilizantes potássicos comerciais sintéticos como o fertilizante NPK (Christofoletti et al., 2013). Contudo, o uso indiscriminado da vinhaça no solo pode levar a problemas ambientais, como salinização e contaminação de corpos hídricos, o que exige estudos contínuos sobre sua aplicação segura e eficiente. Segundo Meurer et al. (2000), os principais contaminantes gerados a partir do uso excessivo da vinhaça em águas superficiais e subterrâneas são o fosfato e o nitrato, respectivamente.

Para mitigar esses impactos, diversas tecnologias têm sido estudadas com o objetivo de adequar a concentração de potássio na vinhaça. Uma abordagem promissora envolve o uso de zeólitas naturais, minerais com alta capacidade de troca catiônica, capazes de adsorver íons potássio presentes na vinhaça. Estudos demonstraram que, após o contato com a vinhaça, a concentração de potássio na zeólita aumentou significativamente, indicando sua eficácia na remoção desse nutriente do efluente. Além disso, a liberação gradual do potássio adsorvido pelas zeólitas pode fornecer um efeito de fertilizante de liberação lenta, beneficiando o desenvolvimento das plantas e reduzindo o risco de lixiviação de nutrientes para os corpos hídricos (Elgharbawy, 2021).

Outra tecnologia em destaque é a aplicação de biochar, um tipo de carvão vegetal produzido a partir da pirólise de resíduos agrícolas como o bagaço de cana-de-açúcar. Quando incorporado ao solo, o biochar pode melhorar suas propriedades físico-químicas, aumentando a capacidade de retenção de nutrientes e reduzindo a mobilidade do potássio. Estudos indicam que a aplicação de biochar em solos tratados com vinhaça pode diminuir a lixiviação de potássio, contribuindo para a sustentabilidade do sistema agrícola (Montiel-Rosales et al., 2022).

Além disso, processos de separação por membranas, como a nanofiltração e a osmose reversa, têm sido explorados para a recuperação de potássio em águas residuárias. Essas tecnologias permitem a concentração e extração eficiente do potássio, possibilitando sua reutilização como fertilizante. Embora apresentem custos operacionais elevados, avanços na pesquisa buscam tornar esses processos mais viáveis economicamente (Silva et al., 2014).

Por fim, métodos químicos de precipitação, utilizando reagentes como o tetrafenilborato de sódio, têm sido investigados para a extração seletiva de potássio da vinhaça. Esse processo permite a recuperação do potássio na forma de cloreto de potássio (KCl), um fertilizante amplamente utilizado na agricultura. A implementação dessa técnica pode reduzir a carga de potássio na vinhaça aplicada ao solo, minimizando os riscos ambientais associados (Montiel-Rosales et al., 2022).

A utilização da vinhaça como fertilizante orgânico na agricultura é uma prática amplamente difundida, especialmente no cultivo de cana-de-açúcar, onde é aplicada via fertirrigação. A fertirrigação com vinhaça tem mostrado ser eficaz no fornecimento de nutrientes essenciais às plantas, promovendo o aumento da produtividade agrícola e a melhoria da fertilidade do solo (Elgharbawy, 2021).

Além disso, a vinhaça pode atuar como uma fonte parcial de água em regiões muito secas, contribuindo para a redução do uso de recursos hídricos na irrigação. Estudos apontam que a aplicação de vinhaça pode reduzir a necessidade de água de irrigação convencional em comparação com a irrigação apenas com água (Elgharbawy, 2021). Entretanto, é fundamental monitorar a dosagem e a frequência de aplicação para evitar impactos negativos no solo e nas águas subterrâneas.

Outra aplicação relevante da vinhaça é na produção de biogás, um tipo de energia renovável obtido pela digestão anaeróbia da matéria orgânica presente no resíduo (Carvalho et al., 2023). O biogás gerado pode ser utilizado para gerar energia elétrica ou térmica, contribuindo para a autossuficiência energética das usinas de etanol (Ceccato-Antonini, 2022). De acordo com os estudos de cada autor mencionado anteriormente, as informações coletadas demonstram que a vinhaça possui um potencial significativo para a geração de biogás, devido à sua alta carga orgânica e teor de carbono (Carvalho et al., 2023). Além disso, o processo de digestão anaeróbia reduz o volume de vinhaça e melhora a qualidade do resíduo final, tornando-o mais seguro para a aplicação agrícola (Leme; Seabra, 2017).

Apesar do potencial da vinhaça como recurso agrícola e energético, existem desafios significativos para seu uso sustentável. A aplicação excessiva de vinhaça no solo pode levar à lixiviação de nutrientes e à contaminação das águas subterrâneas, enquanto o tratamento inadequado do resíduo pode resultar em emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais (Carpanez et al., 2022). Pesquisas futuras devem focar em tecnologias que permitam o tratamento mais eficiente da vinhaça, como a combinação de processos de digestão anaeróbia e tratamento biológico, além de

estratégias de monitoramento ambiental para garantir a segurança de seu uso na agricultura. A integração dessas práticas com a gestão de resíduos e a produção de energia renovável pode contribuir para a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro (Grandis et al., 2024).

Levedura - Saccharomyces cerevisiae

A biotecnologia em alimentos envolve a aplicação de princípios biológicos para melhorar a produção e a qualidade dos alimentos, trazendo benefícios como maior eficiência, segurança e sustentabilidade (Sheldon; Brady, 2022). Um dos organismos mais utilizados na biotecnologia alimentícia é a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, amplamente conhecida por seu papel na fermentação de produtos como pão, cerveja e vinho (Lee et al., 2023). A biotecnologia moderna tem permitido a manipulação genética dessa levedura para otimizar sua eficiência fermentativa e expandir suas aplicações em novos produtos alimentícios (Chambers; Pretorius, 2010).

As leveduras, fungos unicelulares e eucariontes, possuem uma parede celular rica em polissacarídeos e organelas como ribossomos, mitocôndrias, vacúolos e núcleo. Elas são heterotróficas, dependendo de material orgânico previamente formado para se alimentarem (Eliodório et al., 2023).

A biotecnologia possibilita a manipulação genética de *Saccharomyces cerevisiae* para melhorar suas características naturais, aumentando sua eficiência em processos fermentativos industriais e permitindo novas funcionalidades (Chambers; Pretorius, 2010). Modificações genéticas podem melhorar a resistência da levedura a estresses ambientais, como variações de temperatura e pH, além de aumentar a produção de compostos desejáveis, como aromas específicos em bebidas fermentadas (Spencer; Spencer, 1983). Esses avanços tornam *Saccharomyces cerevisiae* uma ferramenta poderosa na indústria de alimentos, permitindo a criação de novos produtos com características únicas.

Além de seu papel na fermentação, há estudos que apontam outras aplicabilidades da *Saccharomyces cerevisiae* na produção de levedura seca, servindo como suplemento alimentar tanto para humanos quanto para animais. A levedura seca é rica em proteínas, vitaminas do complexo B e aminoácidos essenciais, sendo um aditivo valioso na dieta, melhorando a palatabilidade dos alimentos e atuando como um antibiótico natural (Eliodório et al., 2023). Portanto, seu uso tem crescido na indústria alimentícia por ser um ingrediente funcional, com probióticos e minerais essenciais como selênio, zinco, ferro, além de ser uma forma mais saudável devido ao baixo teor de gorduras e calorias (Adebiyi et al., 2019).

Preparo da levedura como insumo alimentício

A fermentação alcoólica ocorre quando microrganismos, especificamente leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, são inoculados no mosto para converter açúcar em etanol e dióxido de carbono (CO_2) (Silva-Fernandes et al., 2022). Para processos industriais, as leveduras devem apresentar características importantes para o alcance de um bom desempenho. A alta velocidade de fermentação em condições ótimas pode ocorrer de 24 a 48 horas, se acelerado o processo em menos de 24 horas- processos otimizados e contínuos (Dombek; Ingram, 1987).

Taxas de tolerância a altos níveis de etanol variam geralmente de 8% a 15% v/v (volumes/volumes) e em outros casos de cepas industriais mais aprimoradas e avançadas podem tolerar até 18% v/v em condições específicas (Zhao; Bai, 2009). O alto

rendimento na conversão de açúcar em etanol pode ser medido a partir de um referencial teórico máximo de conversão mensurado em 51% em massa, ou seja, em 1 tonelada de açúcares é possível produzir cerca de 0,51 tonelada de etanol. Em processos industriais, o rendimento real pode variar, mas em se tratando de eficiência de conversão, o valor teórico é alcançado na faixa de 90% a 95% (Laluce et al., 2012).

Em relação a capacidade da levedura prosperar e manter sua atividade fermentativa mesmo em ambientes ácidos, a *Saccharomyces cerevisiae* geralmente é eficaz em pHs de 4,0 a 6,0. Em processos industriais, o pH precisa ser frequentemente ajustado para mandar condições ideais para o desempenho da levedura (Zhao; Bai, 2009). Leveduras selvagens, geneticamente diferentes da cepa inicial, podem reduzir a eficiência da fermentação e causar problemas como formação excessiva de espuma (Carvalho et al., 2006).

A cinética de crescimento das leveduras é influenciada por nutrientes, temperatura, pH e agitação. A reprodução assexuada, principalmente por brotamento, é comum. Para manter a eficiência do processo, realiza-se a sangria contínua, removendo leveduras excedentes, que são tratadas e utilizadas na produção de levedura seca para alimentação animal ou humana (Van Dijken et al, 1993).

Levedura na alimentação animal

A levedura, particularmente *Saccharomyces cerevisiae*, tem sido amplamente estudada como uma fonte promissora de nutrição animal devido ao seu perfil nutricional rico e seus efeitos positivos na saúde e no desempenho dos animais. Como subproduto da indústria de fermentação, a levedura é uma opção sustentável que pode ser incorporada em dietas de ruminantes, aves, suínos e peixes (Tavares et al., 2021). Estudos indicam que a adição de levedura na alimentação animal pode melhorar a digestibilidade dos nutrientes, fortalecer o sistema imunológico e promover o crescimento, tornando-a uma alternativa viável e eficiente às fontes proteicas tradicionais (Wilson et al., 2022).

A levedura é rica em proteínas de alta qualidade, aminoácidos essenciais, vitaminas do complexo B, minerais, e β-glucanas, que são compostos conhecidos por suas propriedades imunomoduladoras (Jia et al., 2021). A alta concentração de proteínas e aminoácidos, como lisina e metionina, torna a levedura uma excelente opção para complementar dietas animais, especialmente em contextos onde a suplementação proteica é necessária (Nasseri et al., 2011). Além disso, a presença de mananoligossacarídeos (MOS) na levedura ajuda a promover a saúde intestinal, atuando como probióticos que estimulam o crescimento de bactérias benéficas e reduzem a presença de patógenos no trato gastrointestinal dos animais (Jia et al., 2021).

A inclusão de levedura na dieta animal tem mostrado benefícios significativos no desempenho e na saúde dos animais. Em ruminantes, por exemplo, a levedura pode melhorar a fermentação ruminal, aumentando a produção de ácidos graxos voláteis e, consequentemente, a eficiência alimentar (Wilson et al., 2022). Um estudo apontou melhorias significativas no desempenho de engorda nos parâmetros ruminais de cordeiros, quando incluiu a levedura viva na dieta (Tavares et al., 2021).

Em aves, a suplementação com levedura está associada à melhora na conversão alimentar, ao aumento do ganho de peso e à redução da mortalidade. Segundo os estudos de Mikulski et al. (2020), que analisou os efeitos da inclusão de um probiótico à base de levedura na dieta de aves, as melhorias observadas na conversão alimentar e no ganho de peso apontaram um aumento no ganho de peso de 2 a 4% em comparação com o

grupo controle. Em relação a conversão alimentar também melhorou com a suplementação, mostrando uma redução de 2 a 3% na quantidade de alimento necessário para cada unidade de ganho de peso, indicando uma maior eficiência alimentar. Esses resultados indicam que a inclusão de probióticos à base de levedura na dieta das aves pode levar a melhorias significativas na eficiência da produção avícola (Mikulski et al., 2020).

Outro pesquisador que realizou testes de suplementação a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, foi Wilson et al. (2022). Seu estudo foi voltado para os cães, onde observou os metabólitos de fermentação bioativos, células de levedura residuais e fragmentos de parede celular dessa levedura. Neste estudo, a *Saccharomyces cerevisiae* foi investigada por seus impactos na saúde imunológica, estresse oxidativo e saúde da pele e do pelo em cães.

De acordo com os dados adquiridos por Wilson et al. (2022) os cães que tiveram uma dieta com a *Saccharomyces cerevisiae* foram impactados positivamente, conforme os indicadores de saúde da pele e do pelo dos cães, respostas imunológicas e a melhora de alguns marcadores-chave de defesa antioxidante.

O uso de levedura na alimentação animal, como visto anteriormente, oferece vantagens econômicas e ambientais consideráveis como a redução de custos com rações, aumento do ganho de peso, diminuição da pegada de carbono, redução de emissões e a valorização de subprodutos (Wilson et al., 2022).

Do ponto de vista ambiental, a utilização de levedura contribui para a redução do desperdício e para a promoção de uma economia circular, onde subprodutos industriais são reaproveitados como recursos valiosos. A utilização de levedura pode reduzir o desperdício em comparação com a disposição de subprodutos da indústria de fermentação. Em questão de eficiência de reaproveitamento a inclusão de levedura como suplemento na dieta animal pode ter um aproveitamento significativo dos subprodutos da fermentação que, de outra forma, seriam descartados. Esse reaproveitamento representa uma significativa contribuição para a redução de desperdício (Assad, 2017). Além disso, a substituição de ingredientes como a soja por levedura pode ajudar a mitigar os impactos ambientais associados ao cultivo extensivo de soja, como desmatamento e emissão de gases de efeito estufa (Lacerda et al., 2016).

Os benefícios do uso de levedura na alimentação animal são bem documentados, mas ainda existem desafios a serem superados, como custos de produção e variabilidade na composição. A variabilidade na qualidade da levedura, influenciada por fatores como o tipo de substrato utilizado e o processo de fermentação, pode impactar a eficácia de sua utilização em dietas animais, bem como na eficiência alimentar (Dunuweera et al., 2021). Por isso é necessário realizar mais pesquisas para determinar as dosagens ideais de levedura para diferentes espécies e fases de desenvolvimento animal, garantindo que seus benefícios sejam maximizados sem causar efeitos adversos. O avanço das inovações juntamente com a biotecnologia de processamento e a expansão do uso da levedura em dietas animais, especialmente em regiões onde o custo de outras fontes proteicas é elevado, representam áreas promissoras para o futuro.

Levedura na alimentação humana

Do mesmo modo que a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, pode ser utilizada na produção de insumos alimentícios animais, para humanos, essa levedura também traz uma série de benefícios nutricionais, devido às suas múltiplas aplicações na indústria de alimentos

(Eliodório et al., 2023). Além de ser essencial na fermentação de pães, cervejas e vinhos, a levedura também é comercializada como suplemento alimentar, conhecida como levedura nutricional ou levedura de cerveja (Lee et al., 2023). Rica em proteínas, vitaminas e minerais, a levedura tem sido estudada por seus benefícios à saúde, incluindo o fortalecimento do sistema imunológico, a melhora da digestão e o suporte na manutenção dos níveis de energia (Wilson et al., 2022).

A levedura é uma fonte completa de proteínas, contendo a grande maioria dos aminoácidos essenciais que o corpo humano necessita. Além disso, é rica em vitaminas do complexo B, especialmente B12, o que é particularmente benéfico para vegetarianos e veganos, cuja dieta pode ser deficiente desta vitamina. A levedura também contém minerais importantes, como zinco, selênio e magnésio, e fibras dietéticas que promovem a saúde intestinal (Abid et al., 2022). A presença de β-glucanas, polissacarídeos com propriedades imunomoduladoras, contribui para os efeitos benéficos da levedura na saúde humana (Czech et al., 2018).

O consumo de levedura tem sido associado a diversos benefícios à saúde, incluindo o fortalecimento do sistema imunológico, graças às suas β-glucanas, que estimulam a atividade de macrófagos e outras células do sistema imunológico, como na ativação de macrófagos e defesa contra patógenos (Mikulski et al., 2020). A suplementação com β-glucanas pode levar a uma redução na frequência e severidade de infecções bacterianas e virais, apresentando uma redução de até 30% nas infecções em alguns casos. Em relação às atividades fagocíticas, Czech et al. (2018), indicam que β-glucanas são conhecidas por melhorar a atividade fagocítica dos macrófagos. A suplementação com β-glucanas pode aumentar a capacidade dos macrófagos de engolfar e destruir patógenos. Em estudos, a atividade fagocítica pode ser aumentada em até 50% em comparação com controles não suplementados.

Além disso, as vitaminas do complexo B presentes na levedura desempenham um papel crucial no metabolismo energético, ajudando a converter os alimentos em energia. Essas conversões estão presentes nas reações que envolvem as vitaminas B1, B2 e B12, por exemplo (Lee et al., 2023). A vitamina B1, também denominada como tiamina, é essencial para a descarboxilação de alfa-cetoácidos e a conversão de carboidratos em energia. Esta vitamina melhora a capacidade de metabolizar carboidratos e aumenta a produção de ATP, essencial para atividades diárias e desempenho físico (Pacei et al., 2020). Já a vitamina B2, riboflavina, se trata de um componente crucial das coenzimas FAD e FMN, que são essenciais para a oxidação de ácidos graxos e o metabolismo de aminoácidos, facilitando na geração de energia a partir de gorduras e proteínas e melhora a eficiência metabólica. A vitamina B12, a cobalamina, auxilia na síntese de glóbulos vermelhos e no desempenho neurológico, além de estar envolvida no metabolismo de ácidos graxos. Além disso, aumenta a produção de energia e previne anemia, essencial para a função geral do organismo (Nadjar; Fernandez, 2023).

Estudos também sugerem que a levedura pode ajudar a reduzir os níveis inflamatórios, e apoia a função digestiva, graças ao seu conteúdo de fibras e probióticos. Por isso, conforme as evidências, a beta-glucana de levedura fortalece o sistema imunológico e ajuda a proteger o organismo de situações prejudiciais, como inflamações (Mikulski et al., 2020).

A melhoria na saúde cardiovascular foi apontada como outro indicativo benéfico proporcionado pela utilização da levedura na alimentação. A beta glucana encontrada na levedura nutricional ajuda a melhorar os níveis de colesterol e triglicérides, promovendo

um perfil lipídico mais saudável e beneficiando a saúde cardiovascular. Além disso, essa fibra reduz os picos de glicose, auxiliando no controle do colesterol e da glicemia (Renke et al., 2022).

A levedura também está relacionada à função digestiva, graças ao seu conteúdo de fibras e probióticos e é utilizada em uma ampla variedade de produtos alimentícios, desde pães e bolos até suplementos nutricionais e alimentos funcionais (Mikulski et al., 2020). Na panificação, a levedura é fundamental para o processo de fermentação, que leveda a massa e confere sabor e textura aos produtos. Além disso, a levedura nutricional é frequentemente usada como um ingrediente em alimentos veganos, proporcionando um sabor umami, semelhante ao do queijo, e enriquecendo o perfil nutricional das refeições (Abid et al., 2022). Recentemente, a levedura também tem sido explorada em produtos fermentados inovadores, como carnes vegetais e queijos veganos, devido à sua capacidade de criar sabores complexos e texturas agradáveis (Soares; Monassa, 2014).

Apesar dos inúmeros benefícios, o uso de levedura na alimentação humana também apresenta desafios, como a variabilidade na qualidade dos produtos e a necessidade de garantir que eles sejam adequadamente processados para eliminar qualquer possível presença de alérgenos (Selgrade et al., 2009). Além disso, as pesquisas continuam a explorar novas cepas de levedura que possam oferecer perfis nutricionais ainda mais ricos ou propriedades funcionais específicas. O futuro do uso de levedura na alimentação humana parece promissor, com potencial para desenvolvimento de novos produtos que atendam às demandas por alimentos saudáveis, sustentáveis e saborosos (Soares; Monassa, 2014).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao examinar a literatura existente sobre a ressignificação dos resíduos agroindustriais oriundos da cana-de-açúcar em insumos circulares e subprodutos, com foco no reaproveitamento do bagaço, vinhaça e levedura a *Saccharomyces cerevisiae,* bem como os subprodutos obtidos como fertilizantes, insumos alimentícios e bioenergia, por exemplo. Os principais achados revelam os benefícios que o reaproveitamento de resíduos traz em questões de economia circular, sustentabilidade e obtenção de novos produtos, indicando a importância da implementação da biotecnologia nos processos. Esses resultados contribuem significativamente para o avanço do conhecimento na área da biotecnologia, destacando sua importância e influência desde a lavoura até na obtenção final dos produtos.

Em suma, esta revisão destaca a relevância de ressignificação dos resíduos agroindustriais oriundos da cana-de-açúcar em insumos circulares e subprodutos e oferece ressalvas muito interessantes para os avanços da biotecnologia. A continuidade da investigação e a consideração das lacunas identificadas são essenciais para o desenvolvimento futuro e a aplicação prática dos conhecimentos na área.

REFERÊNCIAS

[1] Abid, R., Waseem, H., Ali, J., Ghazanfar, S., Muhammad Ali, G., Elasbali, A. M., & Alharethi, S. H. (2022). Probiotic yeast Saccharomyces: Back to nature to improve human health. Journal of Fungi, 8(5), 444. https://doi.org/10.3390/jof8050444

[2] Adebiyi, J. A., Obadina, A. O., Adebo, O. A., & Kayitesi, E. (2018). Fermented and malted millet products in Africa: Expedition from traditional/ethnic foods to industrial value-added products. Critical reviews in food science and nutrition, 58(3), 463-474. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1188056

[3] Alves, E., Contini, E., Gasques, J. G., Albuquerque, A. C. S., & Silva, A. G. (2008). Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília: EMBRAPA, 68-99.

[4] Alves, E., da Silva, G., & Marra, R. (2011). Êxodo e sua contribuição à urbanização de 1950 a 2010. Revista de Política Agrícola, 20(2), 80-88. https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/61

[5] Assad, L. (2017). Aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro desafia empresas e pesquisadores. Ciência e Cultura, 69(4), 13-16. http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v69n4/v69n4a05.pdf

[6] Azadeh, S., Parashkoohi, M. G., Zamani, D. M., & Firouzi, S. (2024). A comprehensive study on evaluating the environmental effects and energy use efficiency of producing animal feed from sugarcane bagasse. Sugar Tech, 26(6), 1676-1689. https://doi.org/10.1007/s12355-024-01433-w

[7] Barbosa, N. A. A., Sakomura, N. K., Oviedo-Rondon, E. O., Bonato, M. A., Kawauchi, I. M., Dari, L., & Fernandes, J. B. K. (2011). Mannanoligosaccharides in diets for broilers. Ciencia Rural, 41(12), 2171-2177. https://doi.org/10.1590/S0103-84782011001200021

[8] Bezerra, T. L., & Ragauskas, A. J. (2016). A review of sugarcane bagasse for second-generation bioethanol and biopower production. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 10(5), 634-647. https://doi.org/10.1002/bbb.1662

[9] Broda, M., Yelle, D. J., & Serwańska, K. (2022). Bioethanol production from lignocellulosic biomass—challenges and solutions. Molecules, 27(24), https://doi.org/10.3390/molecules27248717

[10] Buainain, A. M., Lanna, R., & Navarro, Z. (Eds.). (2019). Agricultural development in Brazil: The rise of a global agro-food power. Routledge.

[11] Cacuro, T. A., & Waldman, W. R. (2015). Fly-ash from biomass burning: Applications and potentialities. Revista Virtual de Química, 7(6), 2154-2165.

[12] Canilha, L., Chandel, A. K., Suzane dos Santos Milessi, T., Antunes, F. A. F., Luiz da Costa Freitas, W., das Graças Almeida Felipe, M., & Da Silva, S. S. (2012). Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation. BioMed Research International, 2012(1), 989572. https://doi.org/10.1155/2012/989572

[13] Carpanez, T. G., Moreira, V. R., Assis, I. R., & Amaral, M. C. S. (2022). Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. Science of The Total Environment, 832, 154998. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154998

[14] Carvalho, G. G. P. D., Pires, A. J. V., Veloso, C. M., Magalhães, A. F., Freire, M. A. L., Silva, F. F. D., ... & Carvalho, B. M. A. D. (2006). Nutritive value of sugarcane bagasse ammoniated with four urea doses. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 41, 125-132. https://doi.org/10.1590/S0100- 204X2006000100017

[15] Carvalho, J. C., de Souza Vandenberghe, L. P., Sydney, E. B., Karp, S. G., Magalhães Jr, A. I., Martinez-Burgos, W. J., ... & Soccol, C. R. (2023). Biomethane production from sugarcane vinasse in a circular economy: Developments and innovations. Fermentation, 9(4), 349. https://doi.org/10.3390/fermentation9040349

[16] Ceccato-Antonini, S. R. (2022). Microbiology of Ethanol Fermentation in Sugarcane Biofuels. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12292-7

[17] Chambers, P. J., & Pretorius, I. S. (2010). Fermenting knowledge: the history of winemaking, science andyeast research. EMBO reports, 11(12), 914-920. https://doi.org/10.1038/embor.2010.179

[18] Chandel, A. K., Garlapati, V. K., Singh, A. K., Antunes, F. A. F., & da Silva, S. S. (2018). The path forward for lignocellulose biorefineries: bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization. Bioresource technology, 264, 370-381. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.004

[19] Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. Bioresource technology, 102(2), 437-451. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.010

[20] Christofoletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. Waste management, 33(12), 2752-2761. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005

[21] Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). (2023, 22 de agosto). Produção de cana-de- açúcar cresce 10,9%, estimada em 677,6 milhões de toneladas na safra 2023. https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5295-producao-de-cana-de-acucar-cresce-10-9-estimada-em-677-6-milhoes-de-toneladas-na-safra-2023

[22] Corrêa, V. M. (2022). Brazilian sugar-cane sector as a social field: a theoretical and conceptual construct based on a political-cultural approach. Revista de Economia e Sociologia Rural, 61(4), e262813. https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.262813

[23] Cortez, L., Magalhães, P., & Happi, J. (1992). Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. Revista brasileira de energia, 2(2), 111-146.

[24] Czech, A., Smolczyk, A., Ognik, K., Wlazło, Ł., Nowakowicz-Dębek, B., & Kiesz, M. (2018). Effect of dietary supplementation with Yarrowia lipolytica or Saccharomyces cerevisiae yeast and probiotic additives on haematological parameters and the gut microbiota in piglets. Research in Veterinary Science, 119, 221-227. https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2018.06.007

[25] Dantas, G. A., Legey, L. F., & Mazzone, A. (2013). Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, 356-364. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.080

[26] Dombek, K. M., & Ingram, L. O. (1987). Ethanol production during batch fermentation with Saccharomyces cerevisiae: changes in glycolytic enzymes and internal pH. Applied and environmental microbiology, 53(6), 1286-1291.

[27] Duarte, C. G., Gaudreau, K., Gibson, R. B., & Malheiros, T. F. (2013). Sustainability assessment of sugarcane-ethanol production in Brazil: A case study of a sugarcane mill in São Paulo state. Ecological Indicators, 30, 119-129. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.011

[28] Dunuweera, A. N., Nikagolla, D. N., & Ranganathan, K. (2021). Fruit Waste Substrates to Produce Single-Cell Proteins as Alternative Human Food Supplements and Animal Feeds Using Baker's Yeast (Saccharomyces cerevisiae). Journal of Food Quality, 2021(1), 9932762. https://doi.org/10.1155/2021/9932762

[29] Elgharbawy, A. (2021). A review on vinasse A by-product from sugarcane industry. Trends Petro Eng, 1(2), 1-3.

[30] Eliodório, K. P., Cunha, G. C. D. G. E., Lino, F. S. D. O., Sommer, M. O. A., Gombert, A. K., Giudici, R., & Basso, T. O. (2023). Physiology of Saccharomyces cerevisiae during growth on industrial sugar cane molasses can be reproduced in a tailor-made defined synthetic medium. Scientific Reports, 13(1), 10567. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37618-8

[31] Ferreira, V. F., Rocha, D. R. D., & Silva, F. D. C. D. (2009). Potentiality and opportunity in the chemistry of sucrose and other sugars. Química Nova, 32, 623-638. https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300007

[32] Grandis, A., Fortirer, J. S., Navarro, B. V., de Oliveira, L. P., & Buckeridge, M. S. (2024). Biotechnologies to improve sugarcane productivity in a climate change scenario. BioEnergy Research, 17(1), 1-26. https://doi.org/10.1007/s12155-023-10649-9

[33] Goldemberg, J. (2007). Ethanol for a sustainable energy future. science, 315(5813), 808-810.

[34] Jia, L. L., Brough, L., & Weber, J. L. (2021). Saccharomyces cerevisiae yeast-based supplementation as a galactagogue in breastfeeding women? A review of evidence from animal and human studies. Nutrients, 13(3), 727. https://doi.org/10.3390/nu13030727

[35] Jin, Y., Huang, Y., Luo, H., Wang, L., Chen, B., Zhang, Y., ... & Lai, A. (2023). Effects of replacing hybrid giant napier with sugarcane bagasse and fermented sugarcane bagasse on growth performance, nutrient digestibility, rumen fermentation characteristics, and rumen microorganisms of Simmental crossbred cattle. Frontiers in Microbiology, 14, 1236955. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1236955

[36] Joshi, A., Verma, K. K., D Rajput, V., Minkina, T., & Arora, J. (2022). Recent advances in metabolic engineering of microorganisms for advancing lignocellulose-derived biofuels. Bioengineered, 13(4), 8135-8163. https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2051856

[37] Katakojwala, R., Kumar, A. N., Chakraborty, D., & Mohan, S. V. (2019). Valorization of sugarcane

waste: prospects of a biorefinery. In Industrial and municipal sludge (pp. 47-60). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00003-9

[38] Kawaguchi, H., Hasunuma, T., Ogino, C., & Kondo, A. (2016). Bioprocessing of bio-based chemicals produced from lignocellulosic feedstocks. Current opinion in biotechnology, 42, 30-39. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.02.031

[39] Khattab, S. M., & Watanabe, T. (2019). Bioethanol from sugarcane bagasse: status and perspectives. In Bioethanol production from food crops (pp. 187-212). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813766-6.00010-2

[40] Konde, K. S., Nagarajan, S., Kumar, V., Patil, S. V., & Ranade, V. V. (2021). Sugarcane bagasse based biorefineries in India: potential and challenges. Sustainable Energy & Fuels, 5(1), 52-78. https://doi.org/10.1039/D0SE01332C

[41] Lacerda, C., Farias, M. D. O., Silveira, A., Barros, L., & Scivittaro, W. (2017). Efluxo de gases de efeito estufa no cultivo de soja em terras baixas: efeito da época e das operações de preparo do solo.

[42] Laluce, C., Schenberg, A. C. G., Gallardo, J. C. M., Coradello, L. F. C., & Pombeiro-Sponchiado, R. (2012). Advances and developments in strategies to improve strains of Saccharomyces cerevisiae and processes to obtain the lignocellulosic ethanol– A Review. Applied biochemistry and biotechnology, 166(8), 1908-1926. https://doi.org/10.1007/s12010-012-9619-6

[43] Larsen Filho, L., de Oliveira, G. A., Marques, L. G., dos Santos Junior, J. A., da Silveira Alves, J., Medrano, M. D. C. F., ... & de Araújo, L. A. (2024). Potencial da vinhaça como biofertilizante e fonte de geração de energia renovável do tipo biogás. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, 22(6), e5126-e5126. https://doi.org/10.55905/oelv22n6-067

[44] Lee, M. C., Hsu, Y. J., Shen, S. Y., Ho, C. S., & Huang, C. C. (2023). A functional evaluation of anti-fatigue and exercise performance improvement following vitamin B complex supplementation in healthy humans, a randomized double-blind trial. International Journal of Medical Sciences, 20(10), 1272.

[45] Leme, P. R., Silva, S. D. L., Pereira, A. S. C., Putrino, S. M., Lanna, D. P. D., & Nogueira Filho, J. C. M. (2003). Levels of sugarcane bagasse in diets with high concentrate for Nellore steers in feedlot. Revista Brasileira de Zootecnia, 32, 1786-1791. https://doi.org/10.1590/S1516- 35982003000700029

[46] Leme, R. M., & Seabra, J. E. (2017). Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry. Energy, 119, 754-766. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.029

[47] Medina, G. D. S. (2022). The economics of agribusiness in developing countries: Areas of opportunities for a new development paradigm in the soybean supply chain in Brazil. Frontiers in Sustainable Food Systems, 6, 842338. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.842338

[48] Menezes, E. G. T., Alves, J. G. L. F., Valeriano, C., & Guimarães, I. C. (2013). Physico-chemical and sensorial evaluation of sugarcane spirits produced using distillation residue. Brazilian Archives of Biology and Technology, 56, 121-126. https://doi.org/10.1590/S1516-89132013000100016

[49] Meurer, E. J., Bissani, C. A., & Selbach, P. A. (2000). Poluentes do solo e do ambiente. Fundamentos de química do solo. Porto Alegre: Genesis, 1, 151-168.

[50] Mikulski, D., Jankowski, J., Mikulska, M., & Demey, V. (2020). Effects of dietary probiotic (*Pediococcus acidilactici*) supplementation on productive performance, egg quality, and body composition in laying hens fed diets varying in energy density. Poultry science, 99(4), 2275-2285. https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.046

[51] Ministério de Minas e Energia. (2020, 31 de janeiro). Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. Governo do Brasil. https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia- minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica- brasileira

[52] Missio, R. L. (2016). Tratamento do bagaço de cana-de-açúcar para alimentação de ruminantes. Archivos de zootecnia, 65(250), 267-278.

[53] Montiel-Rosales, A., Montalvo-Romero, N., Garcia-Santamaria, L. E., Sandoval-Herazo, L. C., Bautista-Santos, H., & Fernandez-Lambert, G. (2022). Post-industrial use of sugarcane ethanol

vinasse: A systematic review. Sustainability, 14(18), 11635. https://doi.org/10.3390/su141811635

[54] Moore, P. H., & Botha, F. C. (Eds.). (2013). Sugarcane: physiology, biochemistry and functional biology. John Wiley & Sons.

[55] Moraes, B. S., Junqueira, T. L., Pavanello, L. G., Cavalett, O., Mantelatto, P. E., Bonomi, A., & Zaiat, M. (2014). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?. Applied Energy, 113, 825- 835. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.018

[56] Nadjar, Y., & Fernandez, G. (2023). Riboflavin and lower motor neuron diseases. In Vitamins and Minerals in Neurological Disorders (pp. 107-118). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0- 323-89835-5.00014-4

[57] Nascimento, J. M., de Oliveira, J. D., Rizzo, A. C., & Leite, S. G. (2019). Biosorption Cu (II) by the yeast Saccharomyces cerevisiae. Biotechnology Reports, 21, e00315. https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00315

[58] Nasseri, A. T., Rasoul-Amini, S., Morowvat, M. H., & Ghasemi, Y. (2011). Single cell protein: production and process. American Journal of food technology, 6(2), 103-116.

[59] Nepomuceno, A. L., Dossa, D., & Farias, J. R. B. (2007). Biotecnologia na agricultura Qual caminho o Brasil deve seguir?. Revista de Política Agrícola, 16(4), 114-128.

[60] Ogura, A. P., da Silva, A. C., Castro, G. B., Espíndola, E. L. G., & da Silva, A. L. (2022). An overview of the sugarcane expansion in the state of São Paulo (Brazil) over the last two decades and its environmental impacts. Sustainable Production and Consumption, 32 66-75. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.04.010

[61] Okoye, C. O. B., Alum, O. L., Akpomie, K. G., & Alumona, T. N. (2017). Optimization of the fermentation conditions for the production of bioethanol from cane sugar molasses using Saccharomyces cerevisae. Sci. Technol, 18, 48-56.

[62] Pacei, F., Tesone, A., Laudi, N., Laudi, E., Cretti, A., Pnini, S., ... & Colombo, C. (2020). The relevance of thiamine evaluation in a practical setting. Nutrients, 12(9), 2810. https://doi.org/10.3390/nu12092810

[63] Palma, K. R., Tomaz, E., Soria-Verdugo, A., & Silva, M. A. (2021). The influence of the elemental and structural chemical composition on the ash fusibility of sugarcane bagasse and sugarcane straw. Fuel, 304, 121404. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121404

[64] Prasad, S., Gupta, V. C., Bhatt, R., & Dhanya, M. S. (2022). Ethanol production from sugarcane: an overview. Input use efficiency for food and environmental security, 665-686. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5199-1_22

[65] Quintero, J. A., Moncada, J., & Cardona, C. A. (2013). Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic residues in Colombia: a process simulation approach. Bioresource technology, 139, 300-307. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.048

[66] Ramos, P. (2007). Os mercados mundiais de açúcar e a evolução da agroindústria canavieira do Brasil entre 1930 e 1980: do açúcar ao álcool para o mercado interno. Economia Aplicada, 11, 559-585. https://doi.org/10.1590/S1413-80502007000400006

[67] Renke, G., Baesso, T., Paes, R., & Renke, A. (2022). β-glucan "Trained immunity" Immunomodulatory properties potentiate tissue wound management and accelerate fitness recover. ImmunoTargets and Therapy, 67-73. https://doi.org/10.2147/ITT.S381145

[68] Sheridan, R. B. (1958). A Concept of Agribusiness. https://www.jstor.org/stable/1812384

[69] Ravindran, R., & Jaiswal, A. K. (2016). Exploitation of food industry waste for high-value products. Trends in biotechnology, 34(1), 58-69.

[70] Seabra, J. E., & Macedo, I. C. (2011). Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. Energy Policy, 39(1), 421-428. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.019

[71] Selgrade, M. K., Bowman, C. C., Ladics, G. S., Privalle, L., & Laessig, S. A. (2009). Safety assessment of biotechnology products for potential risk of food allergy: implications of new research.

Toxicological sciences, 110(1), 31-39. https://doi.org/10.1093/toxsci/kfp075

[72] Sheldon, R. A., & Brady, D. (2022). Green chemistry, biocatalysis, and the chemical industry of the future. ChemSusChem, 15(9), e202102628. https://doi.org/10.1002/cssc.202102628

[73] Silva, A. P., Bono, J. A., & Pereira, F. D. A. (2014). Fertigation with vinasse in sugarcane crop: Effect on the soil and on productivity. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 18, 38-43. https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100006

[74] Silva Fernandes, F., de Souza, É. S., Carneiro, L. M., Alves Silva, J. P., de Souza, J. V. B., & da Silva Batista, J. (2022). Current ethanol production requirements for the yeast Saccharomyces cerevisiae. International journal of microbiology, 2022(1), 7878830. https://doi.org/10.1155/2022/7878830

[75] Soares, A., & Monassa, J. M. (2014). O emprego da levedura na indústria Food e Feed. REGRAD-Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM-ISSN 1984-7866, 7(1).

[76] Spencer, J. F. T., & Spencer, D. M. (1983). Genetic improvement of industrial yeasts. Annual review of microbiology, 37(1), 121-142. https://doi.org/10.1146/annurev.mi.37.100183.001005

[77] Tavares, L. A., Araújo, M. C. N. D., Barbosa, A. A., Brauner, C. C., Corrêa, M. N., Schmitt, E., .& Pino, F. A. B. D. (2021). Use of Saccharomyces cerevisiae-based products and effects on rumen environment and performance of sheep subjected to dietary changes. Ciência Rural, 51(2), e20200407. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200407

[78] Uddin, A., Liaquat, R., Mumtaz, S., Muddasar, M., Ullah, S., Basit, A., & Arshad, M. (2025). Impact of Pressure on the Alkaline Pretreated Sugarcane Bagasse Feedstock for the Enhanced Production of Bioethanol Through Fermentation Process. Waste and Biomass Valorization, 1-16. https://doi.org/10.1007/s12649-025-03188-1

[79] Van Dijken, J. P., Weusthuis, R. A., & Pronk, J. T. (1993). Kinetics of growth and sugar consumption in yeasts. Antonie van leeuwenhoek,63(3), 343-352. https://doi.org/10.1007/BF00871229

[80] Wilson, S. M., Oba, P. M., Applegate, C. C., Koziol, S. A., Panasevich, M. R., Norton, S. A., & Swanson, K. S. (2023). Effects of a Saccharomyces cerevisiae fermentation product-supplemented diet on fecal characteristics, oxidative stress, and blood gene expression of adult dogs undergoing transport stress. Journal of animal science, 101, skac378. https://doi.org/10.1093/jas/skac378

[81] Zhao, X. Q., & Bai, F. W. (2009). Mechanisms of yeast stress tolerance and its manipulation for efficient fuel ethanol production. Journal of biotechnology, 144(1), 23-30. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2009.05.001

[82] Zhou, Z., Lei, F., Li, P., & Jiang, J. (2018). Lignocellulosic biomass to biofuels and biochemicals: A comprehensive review with a focus on ethanol organosolv pretreatment technology. Biotechnology and Bioengineering, 115(11), 2683-2702. https://doi.org/10.1002/bit.26788

MATERIAL SUPLEMENTAR

Autores	Ano	Título
Abid, R. et al.	2022	Probiotic yeast Saccharomyces: Back to nature to improve human health
Adebiyi, J. A. et al.	2018	Fermented and malted millet products in Africa: Expedition from traditional/ethnic foods to industrial value-added products
Alves, E. et al.	2008	Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas
Alves, E.; da Silva, G.; Marra, R.	2011	Êxodo e sua contribuição à urbanização de 1950 a 2010
Assad, L.	2017	Aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro desafia empresas e pesquisadores
Azadeh, S. et al.	2024	Environmental effects and energy use efficiency of producing animal feed from sugarcane bagasse
Barbosa, N. A. A. et al.	2011	Mannanoligosaccharides in diets for broilers
Bezerra, T. L.; Ragauskas, A. J.	2016	A review of sugarcane bagasse for second-generation bioethanol and biopower production
Broda, M. et al.	2022	Bioethanol production from lignocellulosic biomass—challenges and solutions
Buainain, A. M.; Lanna, R.; Navarro, Z.	2019	Agricultural development in Brazil: The rise of a global agro-food power
Cacuro, T. A.; Waldman, W. R.	2015	Fly-ash from biomass burning: Applications and potentialities
Canilha, L. et al.	2012	Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol : an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation
Carpanez, T. G. et al.	2022	Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock : Opportunities and environmental risks
Carvalho, G. G. P. et al.	2006	Nutritive value of sugarcane bagasse ammoniated with four urea doses
Carvalho, J. C. et al.	2023	Biomethane production from sugarcane vinasse in a circular economy: : Developments and innovations
Ceccato-Antonini, S. R.	2022	Microbiology of Ethanol Fermentation in Sugarcane Biofuels
Chambers, P. J.; Pretorius, I. S.	2010	Fermenting knowledge: the history of winemaking, science and yeast research
Chandel, A. K. et al.	2018	The path forward for lignocellulose biorefineries : bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization
Cherubini, F.; Strømman, A. H.	2011	Life cycle assessment of bioenergy systems : state of the art and future challenges
Christofoletti, C. A. et al.	2013	Sugarcane vinasse: environmental implications of its use
CONAB	2023	Produção de cana-de-açúcar cresce 10,9%, estimada em 677,6 milhões de toneladas na safra 2023
Corrêa, V. M.	2022	Brazilian sugar-cane sector as a social field: a theoretical and conceptual construct based on a political-cultural approach.
Cortez, L.; Magalhães, P.; Happi, J.	1992	Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização
Czech, A. et al.	2018	Effect of dietary supplementation with Yarrowia lipolytica or Saccharomyces cerevisiae yeast and probiotic additives on haematological parameters and the gut microbiota in piglets
Dantas, G. A. et al.	2013	Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes
Dombek, K. M.; Ingram, L. O.	1987	Ethanol production during batch fermentation with Saccharomyces cerevisiae: changes in glycolytic enzymes and internal pH

Autores	Ano	Título
Duarte, C. G. et al.	2013	Sustainability assessment of sugarcane-ethanol production in Brazil: A case study of a sugarcane mill in São Paulo state
Dunuweera, A. N. et al.	2021	Fruit Waste Substrates to Produce Single-Cell Proteins as Alternative Human Food Supplements and Animal Feeds Using Baker's Yeast (Saccharomyces cerevisiae)
Elgharbawy, A.	2021	A review on vinasse A by-product from sugarcane industry
Eliodório, K. P. et al.	2023	Physiology of Saccharomyces cerevisiae during growth on industrial sugar cane molasses can be reproduced in a tailor-made defined synthetic medium
Ferreira, V. F. et al.	2009	Potentiality and opportunity in the chemistry of sucrose and other sugars
Grandis, A. et al.	2024	Biotechnologies to improve sugarcane productivity in a climate change scenario
Goldemberg, J.	2007	Ethanol for a sustainable energy future
Jia, L. L. et al.	2021	Saccharomyces cerevisiae yeast-based supplementation as a galactagogue in breastfeeding women? A review of evidence from animal and human studies
Jin, Y. et al.	2023	Effects of replacing hybrid giant napier with sugarcane bagasse and fermented sugarcane bagasse on growth performance, nutrient digestibility, rumen fermentation characteristics, and rumen microorganisms of Simmental crossbred cattle
Joshi, A. et al.	2022	Recent advances in metabolic engineering of microorganisms for advancing lignocellulose-derived biofuels
Katakojwala, R. et al.	2019	Valorization of sugarcane waste: prospects of a biorefinery
Kawaguchi, H. et al.	2016	Bioprocessing of bio-based chemicals produced from lignocellulosic feedstocks
Khattab, S. M.; Watanabe, T.	2019	Bioethanol from sugarcane bagasse: status and perspectives
Konde, K. S. et al.	2021	Sugarcane bagasse based biorefineries in India: potential and challenges
Lacerda, C. et al.	2017	Efluxo de gases de efeito estufa no cultivo de soja em terras baixas: efeito da época e das operações de preparo do solo
Laluce, C. et al.	2012	Advances and developments in strategies to improve strains of Saccharomyces cerevisiae and processes to obtain the lignocellulosic ethanol– A Review
Larsen Filho, L. et al.	2024	Potencial da vinhaça como biofertilizante e fonte de geração de energia renovável do tipo biogás
Lee, M. C. et al.	2023	A functional evaluation of anti-fatigue and exercise performance improvement following vitamin B complex supplementation in healthy humans, a randomized double-blind trial
Leme, P. R. et al.	2003	Levels of sugarcane bagasse in diets with high concentrate for Nellore steers in feedlot
Leme, R. M.; Seabra, J. E.	2017	Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry
Medina, G. D. S.	2022	The economics of agribusiness in developing countries: Areas of opportunities for a new development paradigm in the soybean supply chain in Brazil
Menezes, E. G. T. et al.	2013	Physico-chemical and sensorial evaluation of sugarcane spirits produced using distillation residue
Meurer, E. J., Bissani, C. A., & Selbach, P. A	2000	Poluentes do solo e do ambiente
Mikulski, D. et al.	2020	Effects of dietary probiotic (Pediococcus acidilactici) supplementation on productive performance, egg quality, and body composition in laying hens fed diets varying in energy density.
Ministério de Minas e Energia	2020	Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira
Missio, R. L.	2016	Tratamento do bagaço de cana-de-açúcar para alimentação de ruminantes

Autores	Ano	Título
Montiel-Rosales, A. et al.	2022	Post-industrial use of sugarcane ethanol vinasse: A systematic review
Moore, P. H.; Botha, F. C.	2013	Sugarcane: physiology, biochemistry and functional biology
Moraes, B. S. et al.	2014	Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?
Nadjar, Y.; Fernandez, G.	2023	Riboflavin and lower motor neuron diseases
Nascimento, J. M. et al.	2019	Biosorption Cu(II) by Saccharomyces cerevisiae
Nasseri, A. T. et al.	2011	Single cell protein: production and process
Nepomuceno, A. L. et al.	2007	Biotecnologia na agricultura Qual caminho o Brasil deve seguir?.
Ogura, A. P. et al.	2022	An overview of the sugarcane expansion in the state of São Paulo (Brazil) over the last two decades and its environmental impacts.
Okoye, C. O. B. et al.	2017	Optimization of fermentation conditions for bioethanol from cane sugar molasses using Saccharomyces cerevisae
Pacei, F. et al.	2020	The relevance of thiamine evaluation in a practical setting
Palma, K. R., Tomaz, E., Soria- Verdugo, A., & Silva, M. A	2021	The influence of the elemental and structural chemical composition on the ash fusibility of sugarcane bagasse and sugarcane straw
Prasad, S., Gupta, V. C., Bhatt, R., & Dhanya, M. S.	2022	Ethanol production from sugarcane: an overview
Quintero, J. A., Moncada, J., & Cardona, C. A.	2013	Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic residues in Colombia: a process simulation approach
Ramos, P.	2007	Os mercados mundiais de açúcar e a evolução da agroindústria canavieira do Brasil entre 1930 e 1980: do açúcar ao álcool para o mercado interno
Renke, G., Baesso, T., Paes, R., & Renke, A	2022	β-glucan "Trained immunity" Immunomodulatory properties potentiate tissue wound management and accelerate fitness recover
Sheridan, R. B.	1958	A Concept of Agribusiness
Ravindran, R.; Jaiswal, A. K.	2016	Exploitation of food industry waste for high-value products
Seabra, J. E.; Macedo, I. C.	2011	Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil
Selgrade, M. K. et al.	2009	Safety assessment of biotechnology products for potential risk of food allergy: implications of new research
Sheldon, R. A.; Brady, D.	2022	Green chemistry, biocatalysis, and the chemical industry of the future
Silva, A. P., Bono, J. A., & Pereira, F. D. A	2014	Fertigation with vinasse in sugarcane crop: Effect on the soil and on productivity
Silva Fernandes, F. et al.	2022	Current ethanol production requirements for the yeast Saccharomyces cerevisiae
Soares, A.; Monassa, J. M.	2014	O emprego da levedura na indústria Food e Feed
Spencer, J. F. T.; Spencer, D. M.	1983	Genetic improvement of industrial yeasts
Tavares, L. A. et al.	2021	Use of Saccharomyces cerevisiae-based products in sheep subjected to dietary changes
Uddin, A. et al.	2025	Impact of Pressure on the Alkaline Pretreated Sugarcane Bagasse Feedstock for the Enhanced Production of Bioethanol Through Fermentation Process
Van Dijken, J. P. et al.	1993	Kinetics of growth and sugar consumption in yeasts
Wilson, S. M. et al.	2023	Effects of a Saccharomyces cerevisiae fermentation product-supplemented diet on fecal characteristics, oxidative stress, and blood gene expression of adult dogs undergoing transport stress
Zhao, X. Q.; Bai, F. W.	2009	Mechanisms of yeast stress tolerance and its manipulation for efficient fuel ethanol production
Zhou, Z. et al.	2018	Lignocellulosic biomass to biofuels and biochemicals: A comprehensive review with a focus on ethanol organosolv pretreatment technology

Capítulo 3

Economia circular e o efeito ricochete: desafios à gestão sustentável dos recursos naturais no ciclo de vida dos produtos

Glaucia Brenny
Adacto Benedicto Ottoni
Nilo Sampaio

Resumo: O modelo econômico linear predominante conduz ao esgotamento de recursos naturais e à degradação ambiental, tornando a Economia Circular (EC) um paradigma fundamental para a sustentabilidade. No entanto, a transição para a EC não é isenta de desafios, sendo o Efeito Ricochete (ER) ou *rebound effect* uma limitação crítica. Este fenômeno ocorre quando ganhos de eficiência são parciais ou totalmente compensados por aumentos absolutos na produção e no consumo. No contexto da EC, o Efeito Ricochete Circular (ERC) surge quando a adoção de práticas de circularidade de forma isolada, em uma única etapa do ciclo de vida do produto, gera resultados não contabilizados ou adversos em outras fases, estimulando o consumo e a demanda por novos recursos naturais primários. Este estudo qualitativo explora o impacto sistêmico do ERC ao longo do ciclo de vida dos produtos, evidenciando uma lacuna de pesquisa na análise integrada desse efeito nas diferentes etapas (extração, produção, distribuição, consumo, descarte) e suas implicações socioambientais e socioeconômicas, relacionadas aos novos padrões de consumo. A pesquisa revela que a implementação de ações de circularidade sem uma avaliação sistêmica e integrada pode resultar em impactos ambientais negativos não contabilizados. Esse estudo visa promover uma compreensão ampliada e crítica das implicações da circularidade para assegurar que ela promova, de fato, a gestão sustentável dos recursos naturais.

1. INTRODUÇÃO

A hegemonia do modelo econômico linear, fundamentada em premissas neoclássicas que historicamente negligenciaram os limites biofísicos planetários, consolidou um metabolismo socioeconômico caracterizado por um fluxo unidirecional de matéria e energia. O problema causado é o desequilíbrio entre o metabolismo físico de nossas economias e o ambiente físico no qual essas economias estão inseridas (DAVID Lazarevic; Göran Finnveden; Miguel Brandão, 2020).

Diferentemente da homeostase observada nos ecossistemas naturais - onde o fechamento de ciclos e a reincorporação de nutrientes asseguram a resiliência sistêmica – a arquitetura produtiva contemporânea opera sob a lógica da extração e do descarte, tratando o meio ambiente como uma fonte inesgotável de *inputs* e um repositório ilimitado de externalidades negativas. Assim, o sistema humano baseia-se, em grande parte, em um fluxo unidirecional de elementos, no qual são extraídos elementos em um local e descartados em outro (Bernard J. Nebel; Richard T. Wright, 1993.

Essa dissonância entre a expansão econômica e capacidade regenerativa do capital natural não apenas precipita o esgotamento de recursos estratégicos (MILLER, 2015), mas subverte a estabilidade ecológica e a segurança global, demandando uma reestruturação urgente pautada pela gestão sistêmica e pela transição para paradigmas de circularidade. Por conseguinte, essas tendências tornaram-se perigosas para a humanidade, porém, não inevitáveis (Arne Naess, 2010).

Cabe elencar que a Economia Circular (EC), é um sistema econômico que utiliza uma abordagem sistêmica para manter um fluxo circular de recursos, ao recuperar, reter ou agregar valor a esses recursos, ao mesmo tempo em que contribui para o desenvolvimento sustentável (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024). Esse conceito possui raízes na economia ambiental, orientando-se, portanto, mais para o comportamento dos agentes econômicos, consumidores e produtores, em particular. As forças de mercado desempenham um papel significativo na determinação das decisões de investimento e desinvestimento relacionados à EC (LOWE et al., 2024).

Sob um prisma analítico, o conceito de EC transcende a mera gestão de resíduos e fundamenta-se nos preceitos da ecologia industrial para otimizar os fluxos de materiais e energia dentro dos sistemas antropogênicos, no qual a entrada de recursos e o desperdício, a emissão e a fuga de energia são minimizadas ao retardar, fechar e estreitar os ciclos de materiais e energia. (CASTRO et al., 2022).

Desse modo, novos avanços na ciência e tecnologia devem desempenhar um papel importante na implementação de uma EC, que se baseia nos princípios de "projetar e eliminar resíduos e poluição, manter produtos e materiais em uso e regenerar sistemas naturais" (HANS Wiesmeth, 2020). Ao manter materiais, componentes e produtos em uso por mais tempo, as estratégias de EC visam desacoplar o crescimento econômico da degradação ambiental, uma perspectiva atraente tanto para formuladores de políticas quanto para empresas (LOWE et al., 2025).

O Efeito Ricochete Circular (ERC), emerge num hiato no qual, de um lado, a EC visa promover a redução dos impactos adversos sobre os recursos naturais, de outro, onde há uma situação na qual pode ocorrer um *rebound effect* ou Efeito Ricochete (ER), em tradução livre. Embora a literatura utilize frequentemente o termo “rebote” nas traduções, essa possui significado diferente nos dicionários de língua portuguesa, dessa maneira, o mais correto seria o emprego da palavra ricochete. Em termos mais claros, a

palavra ricochete significa ato ou acontecimento que ocorre em resposta a uma ação ou a outro acontecimento (Dicionário Michaelis on line, 2025).

O ER é estudado em diversos ramos da ciência, e existem seis perspectivas diferentes que compreendem as premissas subjacentes, as causas e a magnitude de formas diferentes, sendo estas: economia energética, economia ecológica, socio-tecnológica, planejamento urbano, sociopsicológica, e evolucionária (WALNUM; Aall; Lokke, 2014). É importante destacar que o ER pode ocorrer no contexto da economia circular e diminuir significativamente os benefícios ambientais presumidos, uma vez que a teoria da economia circular se concentra demais nos fluxos de recursos materiais e carece da inclusão da economia comportamental e das forças de mercado (IFEYINWA Juliet Orji; FRANK Ojadi, 2022).

As aplicações e avaliações da EC tendem a enfatizar a eficiência ao nível do processo, principalmente ao nível da empresa, no entanto, é ao nível sistêmico que o ER se manifesta com maior frequência (LOWE et al., 2025). Contudo, a eficácia dessa transição não é linear, ela depende de uma avaliação sistêmica e integral de cada etapa do Ciclo de Vida (ACV). A negligência em contabilizar os ER pode resultar em avaliações ambientais que superestimam os benefícios das medidas de EC e na falha de reconhecer cenários nos quais a EC possa apresentar vantagens limitadas ou, inclusive, elevar a carga ambiental global (LOWE et al., 2024).

A incidência do ER desponta como uma limitação crítica à concretização dos benefícios da economia circular, na medida em que, este pode intensificar o consumo de recursos e comprometer a eficácia ambiental pretendida pelos modelos circulares. A percepção sobre o ER permanece reduzida, e a problemática de sua estimativa eficaz continua sendo um desafio amplamente negligenciado (LOWE et al., 2024).

O objetivo principal deste trabalho é estudar o ERC com ênfase nos recursos naturais sobre o ciclo de vida dos produtos. Para atingir este objetivo, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos: analisar as implicações sobre as etapas do ciclo de vida dos produtos, compreender a possibilidade de possíveis impactos socioambientais e socioeconômicos, e estabelecer um diagrama geral de análise global.

2. MÉTODO

Em razão da natureza contemporânea e a complexidade da introdução do conceito de ERC, esta pesquisa está fundamentada em uma abordagem qualitativa de caráter exploratório. A opção metodológica justifica-se pela escassez de evidências empíricas consolidadas sobre o impacto do ERC nas etapas do ciclo de vida dos produtos. Nesse sentido, a pesquisa qualitativa permite uma imersão teórica capaz de estruturar o arcabouço conceitual necessário para a compreensão das externalidades socioambientais e socioeconômicas que emergem da transição para a circularidade.

Para a construção do conteúdo objeto dessa pesquisa, a coleta de dados se baseou em levantamento bibliográfico, e nas bases internacionais de alto impacto Web os Science e Scopus, durante o período de junho de 2026. Primeiramente, foi realizado uma seleção de documentos para compreender os conceitos de *rebound effect*, sendo que foram encontrados na literatura poucos artigos que tratavam sobre este tema. Posteriormente, a esta pesquisa os dados foram examinados em conjunto com as etapas do ciclo de vida do produto, o que permitiu a elaboração da síntese de modelos interpretativos e a construção de diagramas analíticos que evidenciam o impacto sistêmico do ERC sobre a gestão sustentável dos recursos naturais.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO

Considerando o atual modelo linear de produção e consumo que prioriza a escassez dos recursos naturais, a implementação de práticas de EC, configuram-se como um instrumento estratégico da gestão ambiental, contribuindo para que o desenvolvimento sustentável se concretize em benefício das presentes e futuras gerações. Outrossim, pode-se mencionar que o principal apelo da EC é a capacidade de projetar o uso reduzido de materiais e energia, possibilitando assim, o objetivo de equidade em harmonia com o meio ambiente (Gavin Brett Melles, 2023). Sob esta ótica, a EC propõe uma estruturação técnica dos sistemas de produção, fundamentada na redução dos fluxos de matéria e energia, com o fim de assegurar o equilíbrio sistêmico dos processos biofísicos do planeta.

Diante deste panorama, torna-se essencial questionar, quais são de fato, os benefícios ambientais proporcionados com a implementação de práticas circulares nas empresas. Embora, tais modelos sejam amplamente promovidos como soluções sustentáveis para as empresas, necessário se faz avaliar se este modelo, resulta em redução de impactos em todas as etapas do ciclo de vida do produto. Isso porque, práticas circulares podem em alguns casos, gerar impactos em outras etapas, por exemplo: maior consumo energético em processos de reciclagem, uso intensivo de recursos naturais em tecnologias de processamento, ou aumento da complexidade logística. Desse modo, é fundamental investigar potenciais efeitos adversos em cada etapa para compreender as condições que estas poderão ocasionar impactos negativos sobre a gestão dos recursos naturais.

Não é comum que a literatura destaque os casos em que as práticas de EC são malsucedidas e fracassam em cumprir suas promessas ambientais, resultando no chamado ERC, no qual práticas supostamente sustentáveis podem produzir efeitos adversos sobre os recursos naturais em outras etapas do ciclo de vida do produto. O ER clássico manifesta-se quando aumentos na eficiência de produção/consumo são neutralizados devido a aumentos absolutos na produção/consumo, fenômeno conhecido como paradoxo de Jevons (IFEYINWA Juliet Orji; FRANK Ojadi, 2022). Sob este ponto de vista, a otimização microeconômica reduz o custo efetivo do recurso, o que, em um sistema de mercado expansionista, induz a uma escala macroeconômica de consumo superior à economia técnica obtida inicialmente. Portanto, os potenciais benefícios da EC podem ser anulados quando há o aumento da produção e do consumo.

O ERC ocorre especificamente quando o impacto da produção secundária não substitui a produção primária na mesma proporção, resultando em impactos ambientais que são aumentados, e não reduzidos (CASTRO et al., 2022b). Deste modo, estes efeitos negativos permanecem ocultos nas estratégias circulares, uma vez que o ER é omitido das análises de ciclo de vida dos produtos. As metodologias atuais de ACV possuem dificuldades para contabilizar tais interdependências sistêmicas, resultando frequentemente em estimativas de sustentabilidade excessivamente simplistas e otimistas (GREENE et al., 2025). Consequentemente, as empresas se beneficiam dessa lacuna, e divulgam conquistas ambientais infladas que não refletem integralmente os impactos reais ao longo do ciclo de vida do produto. Posto isso, reconhecer e contabilizar o ER é essencial para salvaguardar a integridade ambiental e de mercado na economia circular (IFEYINWA Juliet Orji; FRANK Ojadi, 2022).

Nesse sentido, é possível mencionar que o ERC, ocorre quando as práticas circulares são implementadas de maneira fragmentada, sem considerar uma integração sistêmica. Em outras palavras, a adoção de práticas de circularidade de forma isolada e restrita a uma única etapa do ciclo de vida dos produtos, revela-se insuficiente, sendo imprescindível a

consideração integrada e sistêmica das implicações que tais ações podem gerar nas demais fases, a fim de evitar efeitos colaterais não desejados e promover ganhos efetivos em sustentabilidade. Os ER não são meramente uma resposta ao aumento da eficiência, mas um resultado sistêmico de reconfiguração de ritmos e arranjos espaciais que sustentam ou amplificam a demanda material (GREENE et al., 2025). Portanto, poderá ocorrer uma pressão maior sobre os recursos naturais, como aumento na extração de matérias-primas, elevação do consumo energético e hídrico, intensificação do uso de combustíveis fósseis e geração descontrolada de resíduos. Estes efeitos quando invisíveis, podem comprometer a efetividade das estratégias de circularidade.

Não se pode olvidar que o ERC possui potencial de influenciar significativamente a aplicação das estratégias de gestão sustentável dos recursos naturais, ao modificar tanto a eficácia, quanto a abrangência dessas práticas. Com o intuito de demonstrar esta interferência, a Tabela 1 reúne alguns exemplos representativos dos possíveis impactos decorrentes associados a essa dinâmica.

Contudo a transversalidade dos impactos identificados, revela que o ERC opera como um vetor de transferência de pressões ambientais entre a dimensão dos recursos naturais e as etapas dos processos do ciclo de vida. Enquanto, a ACV tradicional foca em impactos discretos e contabilizados, a análise integrada e sistêmica demonstra que a eficiência lograda em etapas específicas atua como um catalisador de novas demandas sobre os recursos naturais. Portanto, os impactos não contabilizados, como a expansão da frota logística e a exacerbação dos resíduos pós-consumo decorrentes da queda no preço de metais reciclados, evidenciam que os efeitos adversos podem comprometer a gestão sustentável.

A falha na ACV tradicional em capturar dinâmicas de mercado e comportamentais oculta o ERC, tratando o sistema como estático. Exemplificando esta dinâmica, a instalação de painéis fotovoltaicos reduz o custo marginal da eletricidade, contudo, essa economia financeira pode ser redirecionada para a aquisição de novos eletrodomésticos, resultando em um “impacto ambiental invisível” que anula o ganho de eficiência planejado.

Tabela 1 – Exemplos de efeitos do ERC que podem influenciar na gestão dos recursos naturais.

INFLUÊNCIA SOBRE A GESTÃO DOS RECURSOS NATURAIS	EXEMPLOS DE POSSÍVEIS EFEITOS DO ERC
Recursos hídricos	A melhoria da eficiência na irrigação de processos agrícolas, aumenta a produção, consequentemente o uso de fertilizantes, agrotóxicos e o consumo.
Solo	Práticas como aumento de matéria orgânica provenientes de compostagem, podem incentivar mais o plantio, devido a diminuição com custos de fertilizantes químicos.
Agropecuária, Silvicultura, Pesca	Técnicas eficientes podem disponibilizar mais renda para os produtores, devido a diminuição dos custos, logo incentivam ampliação das áreas agrícolas, pastagens, pesca, necessitando expandir para novas áreas e devastar novos ecossistemas.
Energia renovável	Introdução de painéis fotovoltaicos, reduz o consumo de energia, e por outro lado, pode aumentar compra de novos eletrodomésticos/maquinários, havendo mais consumo de energia.
Resíduos	Reciclagem de metais reduz preço dos produtos, isso pode estimular aumento do consumo de novos produtos que impactarão no ambiente.
Recursos minerais	Reutilização de metais diminui custo por unidade, o que pode aumentar o consumo de novos produtos.

Fonte: os Autores, 2026.

3.1. IMPACTOS SINERGÉTICOS DO EFEITO RICOCHETE CIRCULAR NA GESTÃO DOS RECURSOS NATURAIS

Outro aspecto relevante o qual deve ser estudado juntamente com o ER, seria a compreensão da mecânica do efeito sinergético ambiental, uma vez que este fenômeno representa o resultado ampliado e potencializado da interação entre os impactos socioambientais e socioeconômicos associados ao ERC. Essa dinâmica sinergética caracteriza-se por intensificar os danos ecológicos para além dos impactos considerados isoladamente. Em sistemas interligados de recursos naturais, a ausência de uma abordagem analítica e sistêmica pode potencializar o ERC, no qual supostos ganhos de eficiência, podem causar a exaustão do capital natural que não é contabilizado, e consequentemente, subverte os objetivos fundamentais da gestão sustentável dos recursos naturais.

Desse modo, esta lacuna metodológica ao negligenciar os efeitos sinergéticos das interações entre os impactos socioambientais, compromete a eficácia das estratégias circulares adotadas pelos diversos segmentos empresariais. A superação deste hiato é condição para assegurar que as práticas de circularidade não se convertam em entropia ambiental, garantindo que a redução da exaustão do capital natural seja real, e não apenas uma transferência de pressões entre sistemas.

3.2. O IMPACTO SISTÊMICO DO EFEITO RICOCHETE CIRCULAR SOBRE O CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS

No que tange ao tema em questão ora discutido, verificou-se que o principal *gap* da pesquisa está relacionado com a ausência de estudos do ER nas diferentes etapas do ciclo de vida do produto de empresas que realizam práticas de circularidade, e sobre possíveis efeitos sinergéticos socioambientais e socioeconômicos, bem como, as respectivas consequências sobre a gestão sustentável dos recursos naturais impactados, especialmente em um contexto multi-recursos. Essa lacuna é corroborada pela literatura recente, que ressalta que, embora a existência do efeito ricochete seja indiscutível, o conceito é frequentemente negligenciado devido à dificuldade de identificação e avaliação de seus efeitos, em parte pela falta de clareza terminológica e pela inadequação dos indicadores escolhidos (CASTRO et al., 2022b).

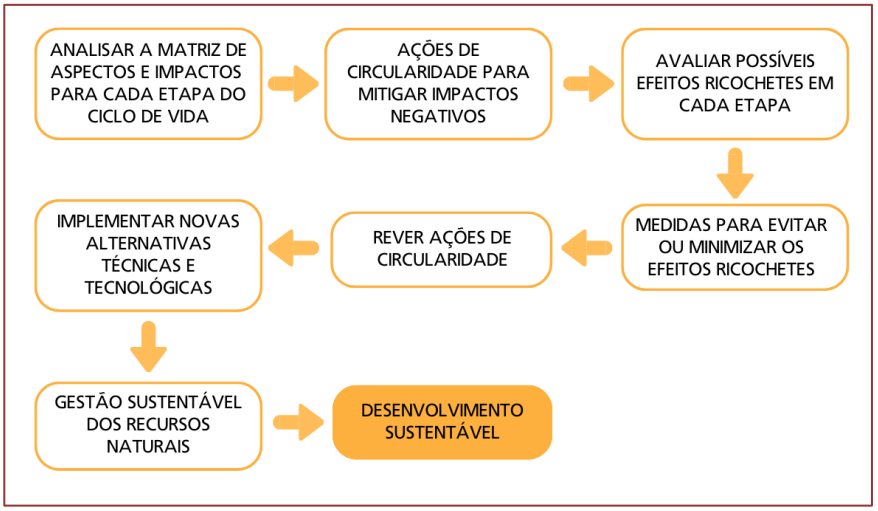
Partindo dessa premissa, convém se analisar na matriz de aspectos e impactos ambientais de cada etapa do ciclo de vida, os possíveis impactos ambientais negativos que podem ser contabilizados, as ações de circularidade para mitigá-los, a fim de manter o fluxo circular dos recursos, ao recuperar, reter ou agregar valor a estes, visando avançar para padrões sustentáveis. Todavia, com base nessa identificação, é preciso avaliar os possíveis efeitos ricochetes e respectivos impactos não contabilizados.

Não se pode olvidar que se trata de uma análise minuciosa, visto que para cada segmento da indústria haverá situações distintas a serem consideradas e estudadas na matriz de aspectos e impactos. A Figura 1 demonstra essas etapas de forma simplificada sob a forma de um diagrama.

Tendo com base esses fundamentos, a Tabela 2 apresenta alguns exemplos de possíveis impactos ambientais contabilizados sobre cada etapa do ciclo de vida do produto, e os impactos não contabilizados provenientes do efeito ricochete.

Diante dessa perspectiva, compreende-se que a circularidade geralmente é implementada apenas sobre uma destas etapas, ou algumas, sem que seja realizado uma avaliação sistêmica e integral sobre o ciclo de vida completo. A ausência dessa avaliação implicará num desequilíbrio nas ações de circularidade, e consequentemente, a interferência na gestão sustentável dos recursos naturais. As aplicações e avaliações da economia circular tendem a enfatizar a eficiência no nível do processo industrial, contudo, é no nível sistêmico que os efeitos ricochete se manifestam com maior frequência (LOWE et al., 2025).

Figura 1 – Etapas de análise das ações de circularidade e efeito ricochete para promoção da sustentabilidade.



Fonte: os Autores, 2026.

Tabela 2 – Exemplos de impactos ambientais contabilizados e não contabilizados com o ER nas etapas do ciclo de vida do produto

ETAPA DO CICLO DE VIDA	IMPACTOS AMBIENTAIS CONTABILIZADOS (ACV TRADICIONAL)	IMPACTOS NÃO CONTABILIZADOS COM O EFEITO RICHOTECHE
Extração dos recursos naturais	Desflorestamento Mineração Contaminação de mananciais e solos Escassez de recursos naturais	Nova extração de recursos naturais para a produção adicional ocasionada por mais consumo
Processo de produção	Necessidade de insumos para transformar a matéria-prima Utilização de energia e água Geração de resíduos	Aquisição de novos insumos Aumento no consumo de energia e água Aumento na geração de resíduos
Distribuição	Consumo de combustíveis fósseis Emissão de gases do efeito estufa	Aumento da frota Aumento de gases do efeito estufa
Consumo	Consumo de produtos Obsolescência planejada	Incentivo de consumo por meio do marketing Aumento do consumo Aumento da utilização de energia Aumento na geração de resíduos
Descarte	Geração de resíduos sem o devido tratamento para a destinação final	Aumento da frota para coleta de resíduos Necessidade de mais espaços para aterros sanitários Perda de matérias ou substâncias que não foram tratadas

Fonte: os Autores, 2026.

Na Figura 2 está mostrado um diagrama com a Análise do efeito ricochete sobre cada etapa do ciclo de vida do produto e sua interferência nas demais etapas.

Figura 2 – Análise do efeito ricochete sobre cada etapa do ciclo de vida do produto e sua interferência nas demais etapas.

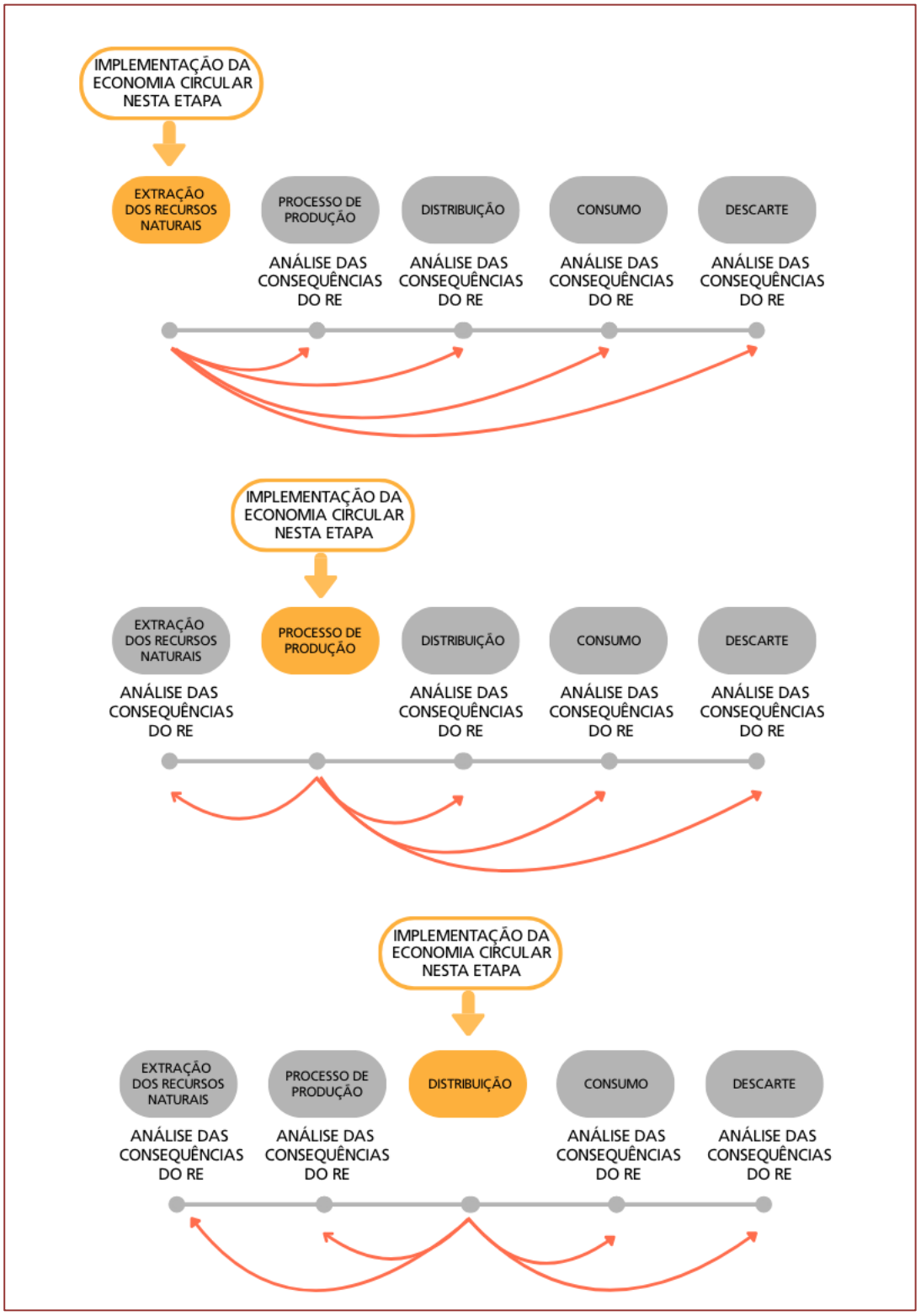
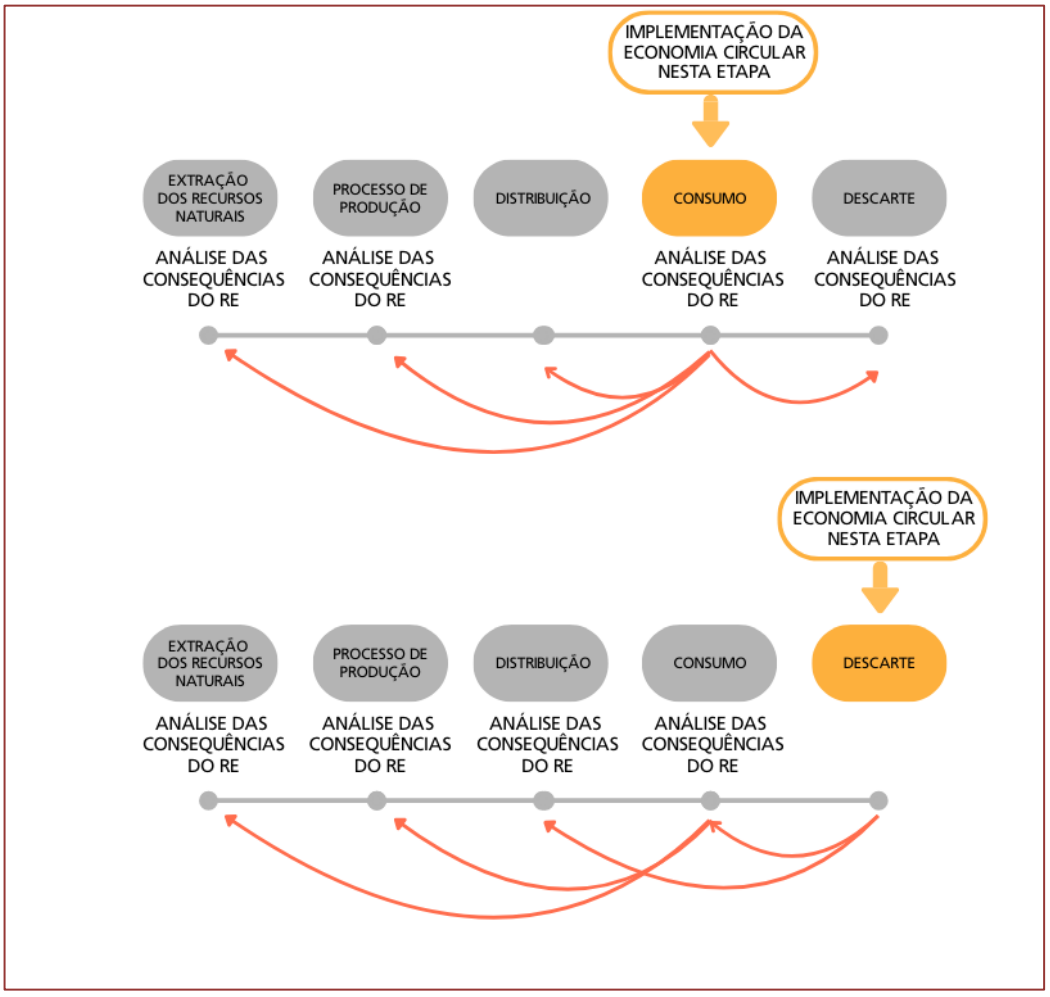


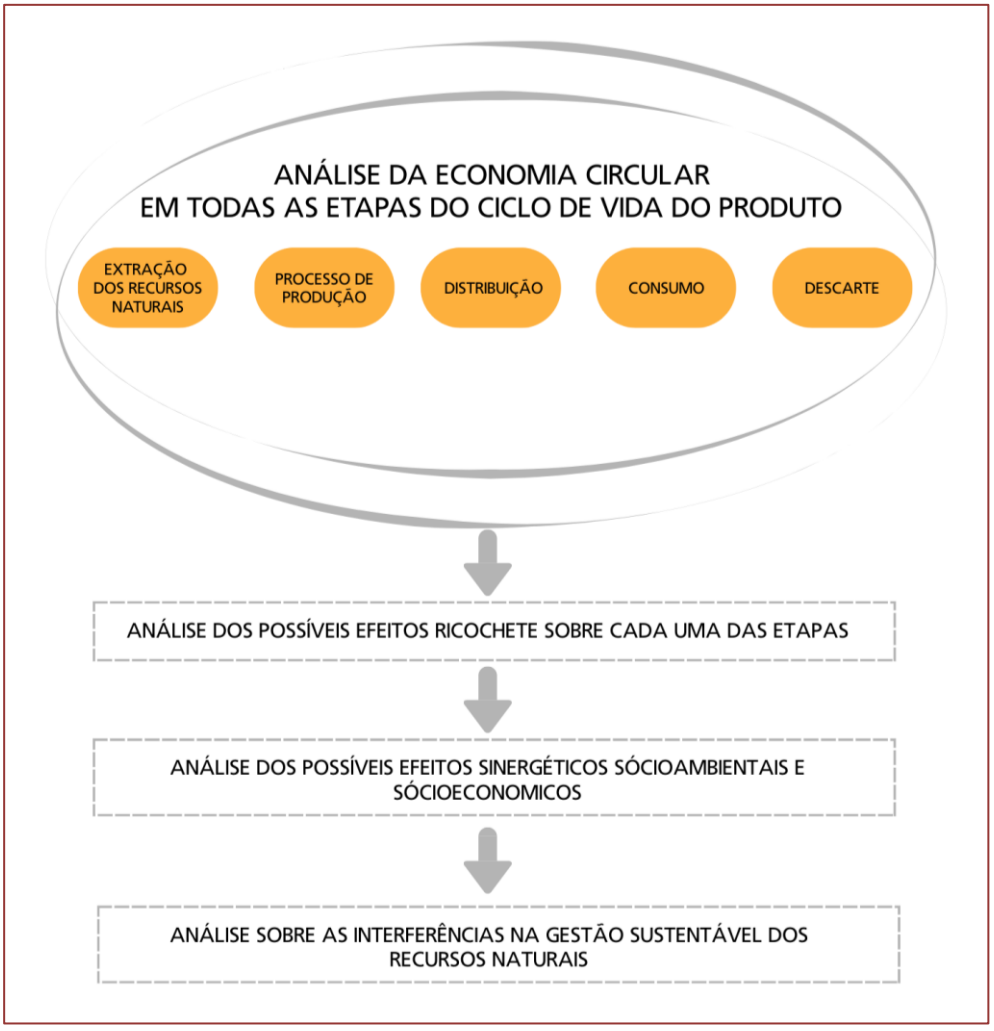
Figura 2 – Análise do efeito ricochete sobre cada etapa do ciclo de vida do produto e sua interferência nas demais etapas. (continuação)



Fonte: os Autores, 2026.

Indubitável é que, para se obter o sucesso na transição para a circularidade, necessário se faz realizar um estudo global conforme é demonstrado na Figura 1. Outrossim, este estudo do efeito ricochete deve ser complementado com a investigação de efeitos sinergéticos socioambientais e socioeconômicos, identificando ainda, possíveis interferências na gestão sustentável dos recursos naturais, como se observa no diagrama mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Análise da economia circular sobre todas as etapas do ciclo de vida do produto e as respectivas consequências do efeito ricochete.



Fonte: os Autores, 2026.

Tendo em vista os argumentos anteriores, a transição para a o modelo circular não pode ser dissociada de estudos complementares sobre o ER, ao passo que a circularidade também pode apresentar impactos ambientais negativos.

Em relação às considerações previamente apresentadas, a transição para o modelo da economia circular demanda de análises complementares sobre o ER. Embora a circularidade seja promissora, tal abordagem pode ensejar em externalidades socioambientais e socioeconômicas com efeitos adversos. A compreensão sistêmica global dessa dinâmica circularidade-ricochete é essencial para garantir os princípios e objetivos da sustentabilidade.

3.3. TECNOLOGIA E CONSUMO INTELIGENTE COMO PREVENÇÃO DO EFEITO RICOCHETE CIRCULAR

É de ser relevado que a investigação das dependências de trajetórias tecnológicas e sociais revelam relações interessantes entre a economia circular, estratégias tecnológicas e o comportamento econômico de consumidores e produtores. Em relação ao caso do efeito ricochete, a reação dos agentes econômicos, que podem ser "guiados" por dependências de trajetória social, nem sempre são completamente previsíveis. Certamente, implementar práticas de economia circular requer uma consideração cuidadosa das possíveis reações comportamentais dos agentes econômicos, apontando para aspectos da economia ambiental comportamental. Não se pode esquecer que há um aspecto adicional: a transição para a circularidade depende de tecnologias apropriadas, no entanto, o ambiente tecnológico, deve ser compreendido como uma ferramenta de alocação. Para evitar que a inovação resulte apenas em maior eficiência seguida de maior consumo, é essencial que o desenvolvimento técnico seja apoiado por políticas ambientais que orientem os agentes econômicos em direção a uma real economia circular (WIESMETH, 2020).

Outra questão extremamente relevante que não pode ser desconsiderada, é que a adoção de metodologias adequadas para analisar o ERC ao logo de cada etapa do ciclo de vida dos produtos, com o objetivo de evitar impactos ambientais adversos, poderá influenciar diretamente os preços de determinados produtos ou serviços, tornando-os mais atrativos e competitivos no mercado. Em decorrência disso, essa dinâmica poderá gerar uma nova redistribuição de receita, direcionando recursos para outros setores, como a expansão de negócios ou aquisição de novos produtos.

4. CONCLUSÃO

Segundo as análises desenvolvidas, constatou-se que a literatura carece de mais investigações sobre o ER na fase de transição para a circularidade, especialmente no que se refere às etapas individuais do ciclo de vida do produto e a ausência de uma análise sistêmica e integral do ciclo de vida do produto como um todo. Dessa forma, a mera otimização técnica dos fluxos dos processos, sem que haja uma visão holística, corre o risco de perpetuar externalidades que desorganizem os objetivos de homeostase e resiliência ecossistêmica.

Importa ressaltar que a literatura não contempla análises sobre o ERC em cada etapa do ciclo de vida aplicado aos sistemas interligados de recursos naturais (como, água-energia, solo-biodiversidade etc.) associados às forças de mercado e economia comportamental, que podem anular ganhos ambientais por meio do aumento absoluto no consumo. Observa-se, ao contrário, uma concentração predominante de estudos sobre energia e materiais, logo, essa lacuna crítica limita a compreensão integral dos impactos negativos da circularidade sob as interações dos recursos naturais como um todo.

Esse hiato impede que gestores antecipem as externalidades negativas que emergem quando a eficiência técnica das atuais práticas de circularidade que reduz determinados custos, poderá induzir a novos ciclos de exaustão do capital natural. Esse estudo ressalta a necessidade de revelar com os impactos ambientais ocultos que ocorrem nos atuais modelos de ACV tradicionais e práticas circulares fragmentadas. Todavia, contabilizar o ERC é uma condição para garantir a integridade das estratégias de sustentabilidade e evitar a divulgação de indicadores de desempenho ambiental que não refletem a realidade.

Diante essa análise verificou-se que há carência de métricas quantitativas, modelos e padrões referentes ao ERC no ciclo de vida dos produtos. Esses estudos, certamente contribuiriam para a implementação de novas metodologias e ações de circularidade para mitigar estes impactos negativos desconhecidos. Sem essas ferramentas analíticas de mensuração, a gestão dos recursos naturais continuará incapaz de evitar que as inovações tecnológicas sejam neutralizadas por padrões de consumo emergentes.

Por outro lado, implementar medidas e ações para se evitar o ERC não é uma tarefa simples, e dependerá de diversos fatores, como o uso de novas técnicas e tecnologias limpas, políticas públicas ambientais, incentivos governamentais, programas de educação ambiental para o consumo consciente, estabilidade do mercado em relação aos preços ofertados, oferta de equivalência e qualidade em relação aos novos produtos disponibilizados, dentre outras medidas.

Cabe mencionar que as políticas públicas voltadas à transição para a circularidade deveriam considerar o ER, bem como, deveriam realizar uma análise sistêmica e global sobre o ciclo de vida dos produtos, devendo incluir os efeitos sinergéticos socioambientais e socioeconômicos, e a gestão sustentável dos recursos naturais, que são elementos essenciais para orientar decisões mais eficazes e evitar impactos ambientais não contabilizados.

Em síntese, o propósito deste estudo não é desestimular a transição para o modelo de economia circular, todavia, é promover uma adoção ampliada e crítica com fulcro na compreensão integral da sustentabilidade, sobretudo, diante dos potenciais efeitos adversos decorrentes de fatores externos não contabilizados. Por tais razões, ao se compreenderem as implicações do ERC ao longo do ciclo de vida do produto, torna-se possível alinhar as práticas de circularidade aos princípios do desenvolvimento sustentável, dentro do equilíbrio entre as viabilidades ecológica, econômica e social, assegurando ganhos de eficiência sem comprometer a gestão sustentável e integral dos recursos naturais.

REFERÊNCIAS

[1] ARNE Naess. **The Ecology of Wisdom: Writings by Arne Naess**. Berkeley: 2010.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 59004:2024 - Economia circular — Vocabulário, princípios e orientações para implementação**. 2024.

[3] BERNARD J. NEBEL; RICHARD T. WRIGHT. **Environmental Science: The Way the World Works**. Reino Unido: 1993.

[4] BIANCHI, Marco; CORDELLA, Mauro. **Does circular economy mitigate the extraction of natural resources? Empirical evidence based on analysis of 28 European economies over the past decade. Ecological Economics**, v. 203, 1 jan. 2023.

[5] CASTRO, Camila Gonçalves *et al.* **The rebound effect of circular economy: Definitions, mechanisms and a research agenda**. **Journal of Cleaner Production.** Elsevier, 15 abr. 2022.

[6] DAVID, Lazarevic; GÖRAN, Finnveden; MIGUEL, Brandão. **Handbook of the Circular Economy**. Reino Unido: 2020.

[7] **Dicionário Michaelis on line**. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=ricochete>. Acesso em: 12 jul. 2025.

[8] Gavin, Brett Melles. **Design for a Sustainable Circular Economy: Research and Practice Consequences**. Alemanha: 2023.

[9] GREENE, Mary *et al.* **Beyond efficiency: rebound effects and the socio-material complexities of circular consumption**. **Consumption and Society**Bristol University Press, , 1 maio 2025.

[10] HANS, Wiesmeth. **Implementing the Circular Economy for Sustainable Development**. Países Baixos: 2020.

[11] IFEYINWA Juliet Orji; FRANK Ojadi. **The Circular Supply Chain: Basic Principles and Techniques**. Estados Unidos: 2022.

[12] LOWE, Benjamin H. *et al.* **Methods to estimate the circular economy rebound effect: A review**. **Journal of Cleaner Production**Elsevier Ltd, , 1 mar. 2024.

[13] LOWE, Benjamin H. *et al.* **Revisiting circular economy rebound: Market dynamics, policy implications, and future research directions**. **Journal of Industrial Ecology**John Wiley and Sons Inc, 1 dez. 2025. MILLER, G. Tyler. **Ciência Ambiental**. São Paulo: 2015.

[14] WALNUM, Hans Jakob; AALL, Carlo; LØKKE, Søren. **Can rebound effects explain why sustainable mobility has not been achieved?** Sustainability (Switzerland), v. 6, n. 12, p. 9510–9537, 2014.

Capítulo 4

Tendências de precipitação e dias secos na Bacia do Rio Formoso (TO): implicações para a gestão de recursos hídricos

Fabrício Kauan da Silva Santos
Roberta Araújo e Silva
Girlene Figueiredo Maciel

Resumo: Este estudo teve como objetivo analisar as tendências do total precipitado e do número de dias secos (NDS) durante a estação chuvosa na Bacia do Rio Formoso, no período de 1969 a 2024, visando compreender alterações no regime hidrometeorológico e suas implicações para a gestão de recursos hídricos. Foram utilizados dados diários de precipitação provenientes de dez estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A análise de tendência e magnitude do total precipitado e do NDS foi realizada por meio dos testes estatísticos não paramétricos de Mann-Kendall e Inclinação de Sen, aplicados tanto à estação chuvosa (setembro a maio) quanto à escala mensal. Os resultados indicaram que 60% das estações apresentaram tendência de redução do volume precipitado durante a estação chuvosa, enquanto o NDS apresentou tendência de aumento em 100% das estações, com incremento médio de 0,47 dias secos por ano. A análise mensal evidenciou variações intra-sazonais, com predominância de redução da precipitação no início e no final da estação chuvosa e aumento do NDS ao longo de todos os meses analisados, sendo observado, em determinados períodos, aumento simultâneo do total precipitado e do número de dias secos, indicando possível concentração temporal das chuvas. Esses resultados sugerem intensificação da irregularidade intra-sazonal da precipitação na região, com potencial aumento da frequência de eventos extremos, reforçando, no contexto da Bacia do Rio Formoso, a necessidade de monitoramento contínuo e adaptação das estratégias de gestão hídrica.

Palavras-chave: Tendência de precipitação; Dias secos; Eventos extremos.

1. INTRODUÇÃO

A bacia do rio Formoso, situada no sudoeste do estado do Tocantins, tem sido palco de recorrentes intervenções institucionais na gestão de recursos hídricos, refletindo a intensificação das pressões antrópicas sobre a disponibilidade hídrica regional. Evidências desse cenário crítico manifestam-se na mediação judicial de conflitos e na suspensão de captações em períodos de estiagem (TJTO, 2024, 2025), além da interrupção histórica de outorgas durante crises de escassez, como registradas em 2016 e monitoradas em 2024, 2025 (NATURATINS, 2016). Embora tais intervenções institucionais busquem mitigar os impactos da crescente demanda por múltiplos usos da água, com destaque para a agricultura irrigada de larga escala, persiste uma lacuna teórica e prática sobre a forma como a variabilidade climática atual acelera e agrava esses episódios.

Sob a ótica da Engenharia Ambiental, o comprometimento das outorgas não advém isoladamente do aumento da demanda, mas da interação entre a pressão de uso e a intensificação da irregularidade intra-sazonal da precipitação. O aumento do Número de Dias Secos (NDS) em plena estação chuvosa invalida a premissa de regimes estacionários adotada no planejamento de infraestruturas, elevando a demanda hídrica instantânea e comprometendo parâmetros fundamentais de vazão de projeto e a concessão de direitos de uso da água nas últimas décadas (MILLY et al., 2008). Essa ruptura do paradigma da estacionariedade, conforme discutido amplamente na literatura técnica, indica que as variações climáticas e antrópicas impedem que o futuro hídrico seja previsto apenas por séries históricas passadas (FERREIRA et al., 2021). Consequentemente, as variações na distribuição temporal das chuvas influenciam o regime hidrometeorológico e reduzem a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos.

A precipitação constitui um dos principais componentes do ciclo hidrológico, exercendo influência direta sobre a recarga de aquíferos e a manutenção das vazões (ROCHA et al., 2005). No bioma Cerrado, o regime pluviométrico apresenta elevada sazonalidade, com aproximadamente 90% da precipitação anual concentrada na estação chuvosa (SILVA et al., 2008). Tal característica reforça a importância da análise conjunta do volume total e da frequência de dias secos, uma vez que a distribuição temporal das chuvas condiciona a segurança hídrica regional.

Estudos recentes evidenciam alterações nesse regime em diferentes escalas. A nível mundial, Mehta et al. (2022) e Sudarsan et al. (2023) observaram variações na dinâmica temporal das chuvas na Índia. No Brasil, enquanto Belém apresenta tendências de aumento (LIRA et al., 2020), o Cerrado central e norte enfrenta reduções significativas (HOFMANN et al., 2023). No Tocantins, Santos, Silva e Maciel (2023) identificaram o encurtamento da estação chuvosa em Palmas, sugerindo mudanças estruturais no regime regional.

Considerando esse panorama, as alterações na dinâmica da precipitação em bacias estratégicas como a do rio Formoso podem ser acentuadas pela expansão agropecuária e supressão vegetal. Torna-se relevante, portanto, investigar a evolução histórica do total pluviométrico e do NDS para identificar implicações sobre a disponibilidade hídrica. Este estudo parte da hipótese de que a bacia apresenta uma tendência de redução no volume da estação chuvosa acoplada ao aumento da frequência de dias secos, fenômeno que contribui diretamente para a obsolescência de modelos de gestão baseados em regimes estacionários e para o agravamento dos eventos críticos de escassez.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a Bacia do Rio Formoso (BRF), localizada na porção sudoeste do estado do Tocantins, inserida na bacia hidrográfica do rio Araguaia (Figura 1). A BRF possui área de drenagem de aproximadamente 21.328,57 km², correspondendo a cerca de 7,7% do território estadual (NATURATINS, 2019; FILHO et al., 2015), estando inserida no bioma Cerrado. A área abrange 18 municípios no estado do Tocantins, dos quais três apresentam apenas interseção marginal com os limites da bacia, conforme dados geoespaciais da Secretaria do Planejamento (TOCANTINS, 2012; TOCANTINS, 2023).

2.2. COLETA, ORGANIZAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados diários de precipitação provenientes de dez estações pluviométricas gerenciadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), obtidos por meio da plataforma HIDROWEB. A localização das estações e suas respectivas informações encontram-se apresentadas na Tabela 1 e na Figura 1.

A série histórica analisada compreendeu o período de 1969 a 2024, considerando-se exclusivamente os dados referentes à estação chuvosa, definida entre os meses de setembro e maio do ano subsequente.

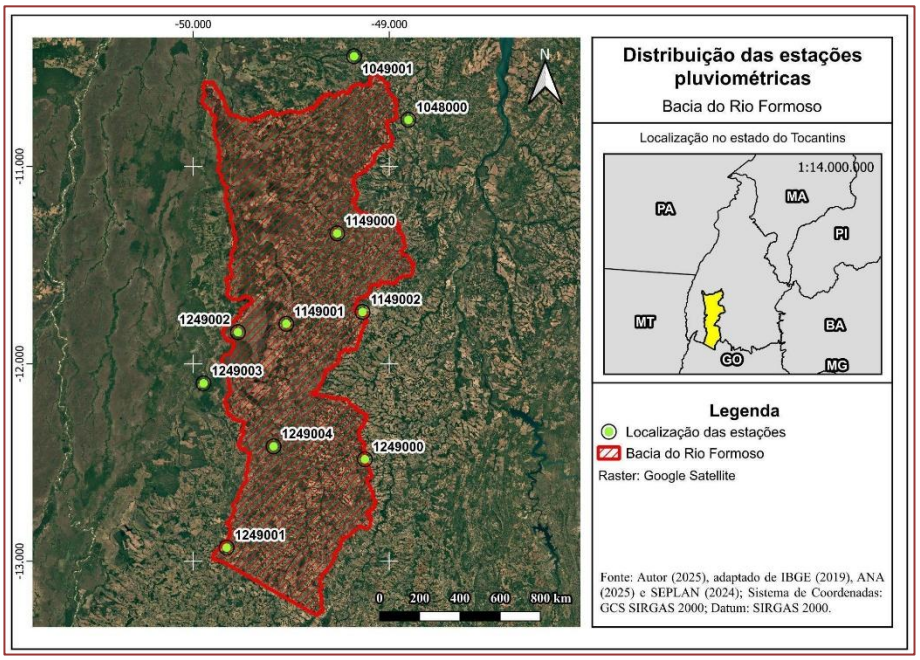
O controle de qualidade dos dados foi realizado em três etapas: validação mensal, com exclusão de meses que apresentaram falhas iguais ou superiores a 10%; validação anual, com exclusão de anos com menos de oito meses válidos; e seleção das estações, mantendo-se apenas aquelas com, no mínimo, 30 anos de dados válidos na estação chuvosa, conforme recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Tabela 1: Caracterização das estações pluviométricas utilizadas no estudo.

Código	Coordenadas (Geográficas)		n (anos)	Bacia hidrográfica	Município
	Latitude	Longitude			
1048000	-10.7636	-48.9022	53	Rio Crixás	Fátima
1049001	-10.4411	-49.1792	42	Rio Pium	Pium
1149000	-11.3389	-49.2653	52	Rio Formoso	Dueré
1149001	-11.7972	-49.525	45	Rio Formoso	Formoso do Araguaia
1149002	-11.7372	-49.1361	53	Rio Santo Antônio	Gurupi
1249000	-12.4836	-49.1244	53	Rio Santa Tereza	Alvorada
1249001	-12.9311	-49.8294	52	Rio Formoso	Araguaçu
1249002	-11.8394	-49.7717	44	Rio Formoso	Formoso do Araguaia
1249003	-12.0986	-49.9475	41	Rio Javaés	Sandolândia
1249004	-12.4181	-49.59	39	Rio Formoso	Sandolândia

Fonte: Autor (2026).

Figura 1: Mapa de distribuição espacial das estações pluviométricas.



Fonte: Autor (2026).

2.3. TESTES ESTATÍSTICOS

A análise de tendência foi realizada por meio do teste não paramétrico de Mann–Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), enquanto a magnitude das tendências foi estimada pela inclinação de Sen (SEN, 1968). O teste de Mann–Kendall é amplamente recomendado para a detecção de tendências monotônicas estatisticamente significativas em séries temporais ambientais (IRANNEZHAD et al., 2016; KOCSIS et al., 2020).

As análises foram aplicadas tanto ao total de precipitação acumulada na estação chuvosa quanto ao número de dias secos no mesmo período, sendo considerado dia seco aquele com precipitação diária igual ou inferior a 1 mm. Adicionalmente, as análises foram conduzidas em escala mensal para o período de setembro a maio.

2.4. TESTE DE MANN-KENDALL

O teste de Mann-Kendall foi empregado para testar a significância estatística (crescente ou decrescente) das séries temporais climatológicas, podendo distinguir um processo de mudança com flutuação natural ou tendência determinística (LI et al, 2019). Conforme BURN et al., (2002), o teste possui dois parâmetros importantes para a análise de tendência: o nível de significância α e a declividade β.

Determinado pelas seguintes equações:

$$S = \sum_{(i<j)} a_{ij}$$

Sendo que a_{ij}:

$$a_{ij} = \text{sinal}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_i < x_j \\ 0, & \text{se } x_i = x_j \\ -1, & \text{se } x_i > x_j \end{cases}$$

Equação da variável S, utilizada quando ela pode ser comparada com uma distribuição normal.

$$\mathrm{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{q}(t_p - 1)(2t_p + 5)}{18}$$

A equação de Z_{MK} é utilizada para avaliar uma tendência estatisticamente significativa, sendo que, se o resultado é positivo, ocorreu um aumento da tendência, e se o valor é negativo, ocorreu uma tendência decrescente.

2.5. INCLINAÇÃO DE SEN'S

Conforme o método não-paramétrico desenvolvido por SEN (1968) (KAHYA et al., 2004), a declividade (mudança por unidade de tempo) pode ser estimada em uma tendência linear presente em uma série. De acordo com (SALMI, et al., 2002) este método tem a capacidade de calcular as inclinações para todos os pares ordenados de dados e em seguida calcula a mediana dessas inclinações como estimativa da inclinação geral.

As estimativas da inclinação de N pares de dados são obtidas por Qi, conforme (KAHYA et al., 2004):

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{j - k}$$

Onde:

- Qi é a inclinação entre dois valores da série temporal;
- Xj e Xk são os valores da série nos tempos j e k, respectivamente.

O número total de pares possíveis (N) é calculado por:

$$N = \left[\frac{n(n-1)}{2}\right]$$

Onde:

- n é o tamanho da série.

O estimador de inclinação de Sen's é a mediana desses N valores de Qi. Os valores N de Qi são classificados em ordem crescente e o estimador de Sen's (Q) é dado por:

1) Se N for ímpar;

$$Q_{mediana} = \left[\frac{N+1}{2}\right]$$

2) Se N for par;

$$Q_{mediana} = \left\{\frac{Q_{\frac{N}{2}} + Q_{\frac{N+2}{2}}}{2}\right\}$$

Para determinar se a inclinação média é estatisticamente diferente de zero, deve-se calcular o intervalo de confiança de $Q_{mediana}$, sendo calculado pela próxima equação, conforme utilizado por (LIRA et al.,2020) e (TAO et al., 2014):

$$C_\alpha = Z_{1-\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\sqrt{Var(S)}$$

Onde:

Var(S) = A mesma definida pela equação de Var(S) para Mann-Kendall;

$Z_{1-(\alpha/2)}$ = Obtido através da tabela de distribuição normal padrão. O intervalo de confiança será, como mencionado anteriormente, para o nível de significância $\alpha = 0{,}05$.

Os limites, inferior e superior, do intervalo de confiança Q_{min} (M_1) e Q_{max} (M_2) são dados pelas equações de M_1 e M_2:

$$M_1 = \frac{(N - C_\alpha)}{2}$$

$$M_2 = \frac{(N + C_\alpha)}{2}$$

Desta forma, a inclinação Qmed é dita como estatisticamente diferente de zero se os dois limites (Q_{min} e Q_{max}) apresentarem o mesmo sinal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise das séries temporais de precipitação durante a estação chuvosa nas 10 estações pluviométricas da BRF, evidenciando comportamentos distintos quanto às tendências. As séries analisadas apresentam, em média, 42 anos de observação, com precipitação média anual de 1.608,94 mm. Do total, 60% das estações (6 estações pluviométricas) apresentaram tendência negativa, indicando redução do volume precipitado nesse período, sendo que duas dessas tendências foram estatisticamente significativas. Duas dessas tendências (estações 1049001 e 1149001) foram estatisticamente significativas ($p < 0{,}05$), com magnitudes acumuladas de -384,94 mm e -378,69 mm, respectivamente. Ademais, a análise do número de dias secos (NDS), cuja média anual foi de 182,86 dias, revelou um padrão consistente de aumento em todas as estações avaliadas, com 100% das séries apresentando tendência positiva, das quais cinco foram estatisticamente significativas. A magnitude média dessas tendências indica um incremento de aproximadamente 0,47 dias secos por ano, evidenciando um aumento na frequência de períodos secos ao longo da estação chuvosa. Destaca-se a estação 1249003, que apresentou a maior taxa de aumento (1 dia seco/ano), resultando em um acréscimo acumulado de 34 dias secos. Esse dado evidencia a intensificação da irregularidade da precipitação, o que invalida as premissas de regimes estacionários adotadas no planejamento regional.

Tabela 2: Tendência e magnitude da precipitação e do número de dias secos durante a estação chuvosa.

Código	Variáveis	N (anos)	Média Anual (mm)|(dia)	Mann-Kendall		Sen's	Magnitude acumulada (mm)|(dia)
				S	Z	(mm/ano) |(dia/ano)	
1048000	PREC	47	1842,64	33	0,29	1,02	47,94
	NDS	47	165,96	145	1,32	0,23	10,81
1049001	PREC	38	1869,83	-183	**-2,29***	-10,13	-384,94
	NDS	38	176,63	105	1,31	0,24	9,12
1149000	PREC	48	1686,9	20	0,17	0,78	37,44
	NDS	48	181,4	78	0,69	0,09	4,32
1149001	PREC	39	1622,41	-219	**-2,64***	-9,71	-378,69
	NDS	39	168	258	**3,11***	0,68	26,52
1149002	PREC	48	1474,95	154	1,36	2,96	142,08
	NDS	48	191,71	580	**5,15***	0,82	39,36
1249000	PREC	47	1435,12	-135	-1,23	-3,19	-149,93
	NDS	47	186,53	488		0,71	33,37
1249001	PREC	48	1521,53	-20		-0,42	-20,16
	NDS	48	199,81	236	**2,09***	0,35	16,8
1249002	PREC	36	1570,91	-20	-0,26	-1,22	-43,92
	NDS	36	171,83	101	1,36	0,19	6,84
1249003	PREC	34	1577,01	-45	-0,65	-2,75	-93,5
	NDS	34	195,12	240	**3,54***	1	34
1249004	PREC	34	1488,08	125	1,84	6,91	234,94
	NDS	34	191,65	100	1,47	0,43	14,62

Nota: $p < 0,05$ foram considerados estatisticamente significativos.

Fonte: Autor (2026).

A análise mensal (Tabela 3) revelou variações intra-sazonais críticas. Nos meses de setembro e maio, predominam tendências negativas na maioria das estações (100% e 90%, respectivamente), com magnitudes médias de -15,87 mm/mês e -12,11 mm/mês. Outubro apresentou o maior declínio, com magnitude média de -38,27 mm/mês. Esses dados sugerem um encurtamento da estação chuvosa na região, similar aos achados de Santos, Silva e Maciel (2024) para outras áreas do Tocantins.

Por outro lado, os meses de novembro e fevereiro apresentaram predomínio de tendências positivas (70% e 80%, respectivamente), com magnitudes médias de 16,18 mm/mês e 32,81 mm/mês, sugerindo aumento do total precipitado nesses períodos. Em março, também se observa predominância de tendências positivas (60%), porém com magnitude reduzida (0,09 mm/mês), indicando variações pouco expressivas. Já no mês de abril, as tendências apresentaram distribuição equilibrada entre valores positivos e negativos (50%), com baixa magnitude média (5,58 mm/mês), evidenciando variabilidade espacial pouco definida. De forma semelhante, o mês de janeiro também apresentou comportamento equilibrado (50%), indicando heterogeneidade espacial das respostas pluviométricas ao longo da BRF.

Além disso, a análise mensal das tendências do número de dias secos (NDS) ao longo da estação chuvosa evidenciou predominância de tendências positivas na BRF, indicando aumento da frequência de dias sem precipitação. Nos meses de setembro, outubro e maio, observou-se que 100% das estações apresentaram tendência de aumento, com magnitudes médias de 1,48; 2,59 e 1,20 dias secos/mês, respectivamente, o que pode indicar um possível encurtamento da estação chuvosa na região. Esse comportamento é consistente com resultados observados em outras áreas do estado do Tocantins, como nos municípios de Palmas, Araguaína, Peixe e Porto Nacional, onde Santos, Silva e Maciel (2024) também identificaram encurtamento da estação chuvosa.

Nos meses de novembro, dezembro e março, a maioria das estações apresentou tendência positiva (80%, 90% e 90%, respectivamente), com magnitudes médias de 1,24; 2,82 e 2,65 dias secos/mês, destacando-se dezembro como o mês de maior magnitude de tendência, associado à segunda maior redução do volume precipitado. Em janeiro, fevereiro e abril, embora o predomínio de tendências positivas tenha sido menor (70%), as magnitudes permaneceram positivas (1,64; 0,91 e 1,73 dias secos/mês), indicando aumento consistente do número de dias secos ao longo de toda a estação chuvosa. De forma geral, os nove meses analisados apresentaram tendência positiva para o NDS, com magnitudes variando de 0,91 (fevereiro) a 2,82 dias secos/mês (dezembro). Ressalta-se, contudo, que esse aumento nem sempre esteve associado à redução do volume precipitado, como observado nos meses de novembro, janeiro, fevereiro, março e abril, que apresentaram aumento simultâneo do número de dias secos e do total precipitado, com magnitudes variando de 0,09 mm/mês (março) a 32,81 mm/mês (fevereiro).

Ademais, na tabela 3 destaca-se o comportamento da estação 1149002, localizada no município de Gurupi (TO), que apresentou, no segundo trimestre analisado, tendências positivas de precipitação, com magnitude média de 70,45 mm/mês, associadas ao aumento no número de dias secos, com magnitude média de 5,21 dias/mês. Esse padrão sugere uma possível concentração do volume precipitado, o que pode favorecer a ocorrência de eventos extremos, como chuvas intensas, alagamentos, enxurradas e sobrecarga do sistema de drenagem urbana. Tal interpretação é reforçada por registros recorrentes de impactos associados a chuvas intensas no município, incluindo episódios de alagamentos, enxurradas e danos à infraestrutura urbana, amplamente reportados em diferentes anos, evidenciando que esses eventos não são casos isolados (SECOM-TO, 2023; G1 TOCANTINS, 2022; G1 TOCANTINS, 2021; GURUPI, 2026).

Tabela 3: Tendência mensal da precipitação e do número de dias secos na estação chuvosa em estações pluviométricas da ANA na bacia do rio Formoso e em suas áreas adjacentes.

Código	Variáveis	Testes estatístico	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI
1048000	PREC	MK	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
		Sen's	-15,51	-67,62	6,11	17,86	100,58	24,84	20,21	-11,28	-16,92
	NDS	MK	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1
		Sen's	1,88	2,76	0	0	-1,41	0	0	0	2,35
1049001	PREC	MK	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
		Sen's	-28,5	-55,1	-152,6	-100,3	1,52	26,64	0,76	-11,78	-44,84
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
		Sen's	1,52	3,8	2,88	1,9	0	0	0	0	1,9
1149000	PREC	MK	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
		Sen's	-8,16	-51,36	89,28	-6,24	60,96	12,88	17,76	-10,08	-6,72
	NDS	MK	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1
		Sen's	1,92	2,4	0	1,44	0	0	0	0	0
1149001	PREC	MK	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
		Sen's	-14,44	-44,07	-24,96	-86,97	-83,46	-9,12	-33,82	1,56	-25,35
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	1,14	0	0	4,68	2,73	1,9	3,42	1,95	3,12
1149002	PREC	MK	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	-2,88	-51,36	-0,48	65,28	72,48	73,6	10,56	21,12	0,94
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	1,44	3,36	4,8	5,76	5,28	4,6	6,24	3,84	0
1249000	PREC	MK	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
		Sen's	-0,47	-19,74	33,37	-26,32	-0,94	-28,52	10,34	33,37	-12,22
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	0,94	5,17	2,35	5,64	4,23	4,14	4,7	3,76	1,88

Tabela 3: Tendência mensal da precipitação e do número de dias secos na estação chuvosa em estações pluviométricas da ANA na bacia do rio Formoso e em suas áreas adjacentes. (continuação)

Código	Variáveis	Testes estatístico	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI
1249001	PREC	MK	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
		Sen's	-20,68	-22,08	14,4	62,04	-12,22	52,8	-17,28	-23,04	-7,68
	NDS	MK	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
		Sen's	1,88	2,88	0	0	2,82	0	1,44	0,96	0
1249002	PREC	MK	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
		Sen's	-22,68	-42,84	21	-11,52	-12,95	65,16	-8,64	46,44	-4,2
	NDS	MK	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1
		Sen's	1,08	1,8	0	0,36	0	-2,88	1,8	0	1,4
1249003	PREC	MK	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
		Sen's	-16,5	-22,78	39,44	-93,5	-29,58	37,4	-10,2	10,88	0
	NDS	MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Sen's	1,65	2,38	3,4	5,78	3,74	2,38	4,76	3,4	0
1249004	PREC	MK	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
		Sen's	-28,9	-5,78	136,29	-12,54	37,06	72,42	11,2	-1,36	-4,08
	NDS	MK	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1
		Sen's	1,36	1,36	-0,99	2,64	-1,02	-1,02	4,16	3,4	1,36

Fonte: Autor (2026).

Dessa forma, os resultados indicam intensificação da irregularidade intra-sazonal das chuvas na BRF, caracterizada pelo aumento do número de dias secos e pela redistribuição temporal da precipitação, podendo favorecer a ocorrência de eventos mais intensos na região. Ademais, conforme Lira et al. (2020) a variabilidade da precipitação influencia diretamente o balanço hídrico e a dinâmica dos sistemas hidrológicos. No contexto da Bacia do Rio Formoso, esses resultados ganham relevância diante do uso intensivo dos recursos hídricos pelo setor agropecuário, associado à redução das vazões na região (BORGES SOBRINHO et al., 2020), e à recorrência de crises hídricas marcadas por conflitos pelo uso da água, intervenções judiciais e fragilidades na governança dos recursos hídricos (BORGES et al., 2023). Assim, os resultados indicam que as alterações no regime pluviométrico não são pontuais, refletindo mudanças na dinâmica hidrometeorológica regional e demandando monitoramento contínuo e adaptação da gestão dos recursos hídricos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciam tendências distintas no total precipitado e no número de dias secos. Observou-se predominância de redução do volume precipitado em parte das estações, associada ao aumento generalizado do NDS, indicando alterações no regime pluviométrico com indícios de encurtamento da estação chuvosa.

A análise conjunta indica que essas mudanças não ocorrem de forma uniforme. O aumento simultâneo dos dias secos e do volume precipitado em determinados períodos sugere uma redistribuição temporal das chuvas, com concentração em eventos mais intensos e maior frequência de extremos. Essas alterações comprometem critérios clássicos de dimensionamento hidráulico baseados na hipótese de estacionariedade, exigindo a revisão de parâmetros de projeto em sistemas de abastecimento e irrigação. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de incorporar a não estacionariedade climática e as pressões antrópicas nos processos de planejamento e gestão de recursos hídricos, visando maior resiliência frente aos cenários de variabilidade e mudança climática na bacia do rio Formoso.

REFERÊNCIAS

[1] BORGES SOBRINHO, A. et al. **Agropecuária e comportamento hídrico: sub-bacia do rio Formoso**. In: SCAPIN, E.; ALBIERI, L.; NAVAL, L. P. (org.). Agropecuária e meio ambiente. Palmas: EDUFT, 2020.

[2] BORGES, M. S. et al. **Conflitos e contradições na governança da Bacia do Rio Formoso – Tocantins – Brasil**. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 19, n. 3, 2023. DOI: https://doi.org/10.54399/rbgdr.v19i3.6607. Acesso em: 12 abr. 2026.

[3] BURN, D. H.; ELNUR, M. A. H. **Detection of hydrologic trends and variability**. Journal of Hydrology, v. 255, p. 107-122, 2002.

[4] FERREIRA, Fernanda L. V. et al. **Time series trends of streamflow and rainfall in the Santo Antônio River Basin, Brazil**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 41, n. 1, p. 47–55, jan. 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p47-55/2021

[5] FILHO, N. L. et al. **Characterization of water users in the Rio Formoso/TO watershed**. Environmental Engineering: Research and Technology, v. 12, n. 2, 2015.

[6] G1 TOCANTINS. **Chuva forte derruba muros, alaga ruas e deixa casas cheias de lama em Gurupi. 2021**. Disponível em: https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2021/02/10/chuva-forte-derruba-muros-alaga-ruas-e-deixa-casas-cheias-de-lama-em-gurupi.ghtml. Acesso em: 9 abr. 2026.

[7] G1 TOCANTINS. **Com chuva intensa, avenidas viram rios e motoristas têm prejuízos com veículos em Gurupi**. 2022. Disponível em: https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2022/12/14/com-chuva-intensa-avenidas-viram-rios-e-motoristas-tem-prejuizos-com-veiculos-em-gurupi.ghtml. Acesso em: 9 abr. 2026.

[8] GURUPI. **Prefeitura Municipal. Prefeitura de Gurupi intensifica limpeza e desobstrução de vias após fortes chuvas**. 2026. Disponível em: https://gurupi.to.gov.br/2026/02/prefeitura-de-gurupi-intensifica-limpeza-e-desobstrucao-de-vias-apos-fortes-chuvas-nesta-segunda-feira-02/. Acesso em: 9 abr. 2026.

[9] HOFMANN, G. S. et al. **Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado**. Scientific Reports, v. 13, art. 2945, 2023.

[10] IRANNEZHAD, M. et al. **Century-long variability and trends in daily precipitation characteristics at three Finnish stations**. Advances in Climate Change Research, v. 7, p. 54–69, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.accre.2016.04.004.

[11] KAHYA, E.; KALAYC, S. **Trend analysis of streamflow in Turkey**. Journal of Hydrology, v. 289, n. 1-4, p. 128-144, 2004.

[12] KENDALL, M. G. **Rank correlation measures**. London: Charles Griffin, 1975.

[13] KOCSIS, T.; SZÉKELY, I. K.; ANDA, A. **Homogeneity tests and non-parametric analyses of tendencies in precipitation time series in Keszthely, Western Hungary**. Theoretical and Applied Climatology, v. 139, p. 849–859, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s00704-019-03014-4

[14] LI, G.; ZHANG, J.; DING, S.; WU, P.; WANG, W. **Reconstruction of sunspot activity, cold and warm events, and drought and flood events in the Central Plain of China during the Northern Song Dynasty using historical documents**. Quaternary International, v. 525, p. 36-44, 2019.

[15] LIRA, B. R. P. et al. **Identificação de homogeneidade, tendência e magnitude da precipitação em Belém (Pará) entre 1968 e 2018**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v. 43, n. 4, p. 426–439, 2020.

[16] MANN, H. B. **Nonparametric tests against trend**. Econometrica, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

[17] MEHTA, P. et al. **Variability and time series trend analysis of rainfall in the mid-hill sub humid zone: a case study of Nauni**. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 80466–80476, 2022.

[18] MILLY P.C.D., Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch RM, Kundzewicz ZW, Lettenmaier DP. **Stationarity Is Dead: Whither Water Management?**. Science 319(5863):573-574, 2008. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1151915

[19] NATURATINS. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Formoso**. 2019. Disponível em: https://naturatins.to.gov.br. Acesso em: 12 abr. 2026.

[20] ROCHA, H. R. et al. **Caracterização física do Cerrado pé-de-gigante e uso das terras na região**. In: PIVELLO, V. R.; VARANDA, E. M. (org.). O Cerrado do pé-de-gigante. São Paulo: SMA, 2005.

[21] SALMI, T. ; Maatta, A.; Antilla, P. **Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates: the Excel template application MAKESENS**. Helsinki: Finnish Meteorological Institute, p. 35, 2002.

[22] SANTOS, V. C.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F. **Avaliação de tendência do início, fim, duração e total de precipitação da estação chuvosa de Palmas - TO**. Revista Desafios, 2023.

[23] SANTOS, V. C.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F. **Detecção de tendências na estação chuvosa do estado do Tocantins**. Revista Desafios, v. 11, n. 3, 2024.

[24] SECOM (TOCANTINS). **Com forte chuva em Gurupi, bombeiros militares apoiam moradores atingidos por enxurrada**. 2023.

[25] SEN, P. K. **Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau**. Journal of the American Statistical Association, 1968.

[26] SILVA, F. M.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. **Caracterização climática do Bioma Cerrado**. In: Cerrado: ecologia e flora. Brasília: Embrapa, 2008.

[27] Sudarsan, G. Lasitha, A. **Rainfall Trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope test estimation- A case study**. E3S Web of Conferences v.405, n.04013, p. 1-8, 2023.

[28] TAO, H.; FRAEDRICH, K.; MENZ, C.; ZHAI, J. Trends in extreme temperature indices in the Poyang Lake Basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 28, n. 6, 1543-1553, 2014.

[29] TOCANTINS. Instituto Natureza do Tocantins (NATURATINS). **Naturatins suspende a outorga de recursos hídricos**. 2016.

[30] TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Orçamento (SEPLAN). **Base cartográfica do Estado do Tocantins: bacias hidrográficas**. 2012.

[31] TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Orçamento (SEPLAN). **Base cartográfica do Estado do Tocantins: limite municipal 2022 A**. 2023.

[32] TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO TOCANTINS (TJTO). **Captação de água na bacia do rio Formoso no período de estiagem está suspensa por tempo indeterminado a partir de 2025**. 2024. Disponível em: https://www.tjto.jus.br. Acesso em: 26 mar. 2026.

[33] TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO TOCANTINS (TJTO). **Justiça suspende outorgas para captação de água na estiagem e mantém multas por irregularidades na bacia do rio Formoso**. 2025. Disponível em: https://www.tjto.jus.br/comunicacao/noticias/justica-suspende-outorgas-para-captacao-de-agua-na-estiagem-e-mantem-multas-por-irregularidades-na-bacia-do-rio-formoso-2. Acesso em: 26 mar. 2026.

Capítulo 5

Utilização de estatística multivariada para estudar a poluição em um corpo d'água específico na região sul do estado do Rio de Janeiro

Nilo Antonio de Souza Sampaio
Glaucia Maria Brenny
Victória do Nascimento Rodrigues

Resumo: O objetivo desse trabalho é demonstrar a aplicação da Estatística Multivariada por meio de uma Análise de Componentes Principais (ACP) em um rio localizado na região Fluminense, do estado do Rio de Janeiro, Brasil. A ACP pode ser generalizada como uma análise de correspondência para lidar com variáveis, bem como uma análise multifatorial para tratar de variáveis heterogêneas e conjuntos de variáveis. Do ponto de vista matemático, a ACP baseia-se na autocomposição de matrizes semidefinidas positivas e da decomposição em valores singulares de matrizes retangulares. As amostras de água foram coletadas em triplicatas em um rio Fluminense, do estado de Rio de Janeiro, e os dados foram tratados utilizando Estatística Multivariada. Conclui-se que a Estatística Multivariada é uma opção viável para relacionar dados ambientais. No caso específico do rio analisado, pode-se observar que algumas variáveis apresentam correlação positiva, e outras negativa, e algumas não apresentar qualquer correlação, indicando a necessidade de um estudo mais profundo em conjunto com outras ferramentas estatísticas para uma análise mais abrangente. Os episódios de uso da Estatística Multivariada estão se multiplicando na literatura científica e tem se mostrado altamente eficazes no tratamento de dados que atendem às premissas de normalidade. Apesar de serem ferramentas estatísticas amplamente conhecidas, os Mapas Fatoriais são amplamente utilizados e podem trazer inovações para sua aplicação, como em eventos de variáveis ambientais.

Palavras-chave : Estatística Multivariada, Mapa Fatorial, Rio, Variável Ambiental.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do último século, a estatística revolucionou a ciência ao apresentar modelos úteis que modernizaram o processo de pesquisa, orientando-o para parâmetros investigativos mais robustos e possibilitando a tomada de decisões em uma ampla variedade de áreas. Os métodos estatísticos foram desenvolvidos como uma combinação de ciência e lógica para a solução e investigação de problemas em diversos campos do conhecimento humano (Abraão et al., 2024; Akdur , 2022; Antônio et al., 2023; Borges et al., 2024; de Araújo et al., 2021; Mazza et al., 2022, 2024; N. UM. S. Sampaio, Mazza, Siqueira, et al., 2024; Nilo Antônio de Souza Sampaio, Júnior, Almeida, et al., 2024; Silva et al., 2023).

O monitoramento de corpos hídricos de bacias sob pressão antrópica demanda a compreensão dos ecossistemas dinâmicos. A qualidade da água em rios integra diversos parâmetros físico-químicos e ambientais em poucos eixos interpretáveis. Nesse sentido, a estatística se torna um instrumento de gestão ambiental que irá auxiliar na priorização de ações (Xiaoxue et al., 2020), otimizar redes de monitoramento, reduzindo estações e variáveis sem perder informações (Liu, et al. 2021), e apoiar o tratamento de esgotos e cenários de intervenção (Zhang et al. 2021)

Métodos estatísticos multivariados e ferramentas de análise estatística multivariada estudam o comportamento de três ou mais variáveis simultaneamente. Estes são usados principalmente para encontrar a variável menos representativa e eliminá-la, simplificando modelos estatísticos, onde o número de variáveis torna-se um problema para entender a relação entre diversos grupos de variáveis (RC Leoni et al., 2017).

Dessa forma, a análise univariada tradicional acaba sendo insuficiente para elucidar fenômenos multifatoriais complexos, como o caso da eutrofização, isto porque, esta falha em capturar as correlações intrínsecas e as sinergias que podem impactar a qualidade da água. Portanto, a estatística multivariada acaba sendo uma abordagem central para dados ambientais multidimensionais (Muniz at al., 2023)

O lançamento de um novo produto e/ou processo geralmente envolve um trabalho com um grande número de variáveis. É indispensável o planejamento criterioso dos experimentos que devem ser utilizados para manipular essas variáveis e alcançar as respostas desejadas para a obtenção de resultados confiáveis e para a realização de análises estatísticas consistentes. Nesse contexto, já não é possível desenvolver produtos e processos de forma empírica como era feito no passado. A concorrência acerbada, a difusão de processos tecnológicos e a responsabilidade científica tornam tais procedimentos inviáveis. Portanto, a otimização de processos e produtos requer um estudo estatístico robusto (Cardoso et al., 2022; Carvalho, 2023; da Motta Reis e al., 2023; De Almeida e outros, 2020; Espuny e outros, 2023; F. da S. Gomes et al., 2022; F. M. Gomes et al., 2023; Júnior et al., 2023; Roberto Campos Leoni et al., 2017; Reis et al., 2024; Vendas et al., 2022; NAS Sampaio , Mazza , Siqueira , et al., 2024; Nilo Antônio de Souza Sampaio et al., 2025; Vasconcelos et al., 2024) .

O objetivo deste trabalho é demonstrar a aplicação dos resultados obtidos com a Análise de Componentes Principais, por meio de um Mapa Fatorial, na avaliação de amostras coletadas em triplicata em um rio da região Fluminense, no estado do Rio de Janeiro, Brasil, a fim de evidenciar como a abordagem multivariada poderá contribuir para a interpretação integrada das variáveis ambientais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Diversos métodos de análise estatística podem ser usados para determinar o grau de similaridade entre espécies relacionadas. Um dos métodos amplamente aplicado é análise de agrupamentos (*cluster analysis*). A análise de agrupamento hierárquico, que determinada, com base nos dados de entrada, a similaridade de um determinado elemento em relação aos demais, demonstra-se particularmente útil. Essa abordagem estatística apresenta diversas vantagens, como a combinação de dados qualitativos e quantitativos, possibilitando, assim, o uso de todas as informações disponíveis sobre a amostra. Além disso, cada entrada é tratada como uma entidade individual de igual peso na análise, diferente de outras técnicas multivariadas que dependem da variação entre grupos de entradas (Chakraborty) et al., 2018; Peeters & Martinelli , 1989).

A análise de componentes principais (ACP) é provavelmente a técnica estatística multivariada mais popular, e é utilizada praticamente em várias disciplinas estatísticas. Entretanto, esta pode ser generalizada como uma análise de correspondência para lidar com variáveis, bem como uma análise multifatorial para tratar variáveis heterogêneas e conjuntos de variáveis. Do ponto de vista matemático, a ACP baseia-se na autodecomposição de matrizes semidefinidas positivas e na decomposição em valores singulares de matrizes retangulares (Chakraborty et al., 2018).

A ACP foi desenvolvida em 1901 por Karl Pearson e, atualmente, é amplamente utilizada como ferramenta para Análise Exploratória de Dados e construção de modelos preditivos. A ACP pode ser realizada por decomposição de uma matriz de covariância em autovalores, geralmente após o centramento (e normalizando ou usando pontuações-Z) da matriz para cada atributo (Derksen et al., 2000; Febriani et al., 2020; Semagn et al., 2000).

Trata-se de um procedimento matemático que utiliza uma transformação ortogonal (ortogonalização de vetores) para converter um conjunto de observações de variáveis possivelmente correlacionadas em um conjunto de valores de variáveis linearmente não correlacionadas, denominadas componentes principais. O número de componentes principais é sempre menor ou igual ao número de variáveis originais. As componentes principais são independentes apenas se os dados apresentarem distribuição normal (conjunta). A ACP é sensível à escala relativa das variáveis originais. Dependendo da área de aplicação, a ACP, também pode ser conhecida como: Transformada Discreta de Karhunen-Loève (KLT), ou Transformada de Hotelling ou Decomposição Ortogonal Própria (DOP) (Mazza) et al., 2022; Mo et al., 2017).

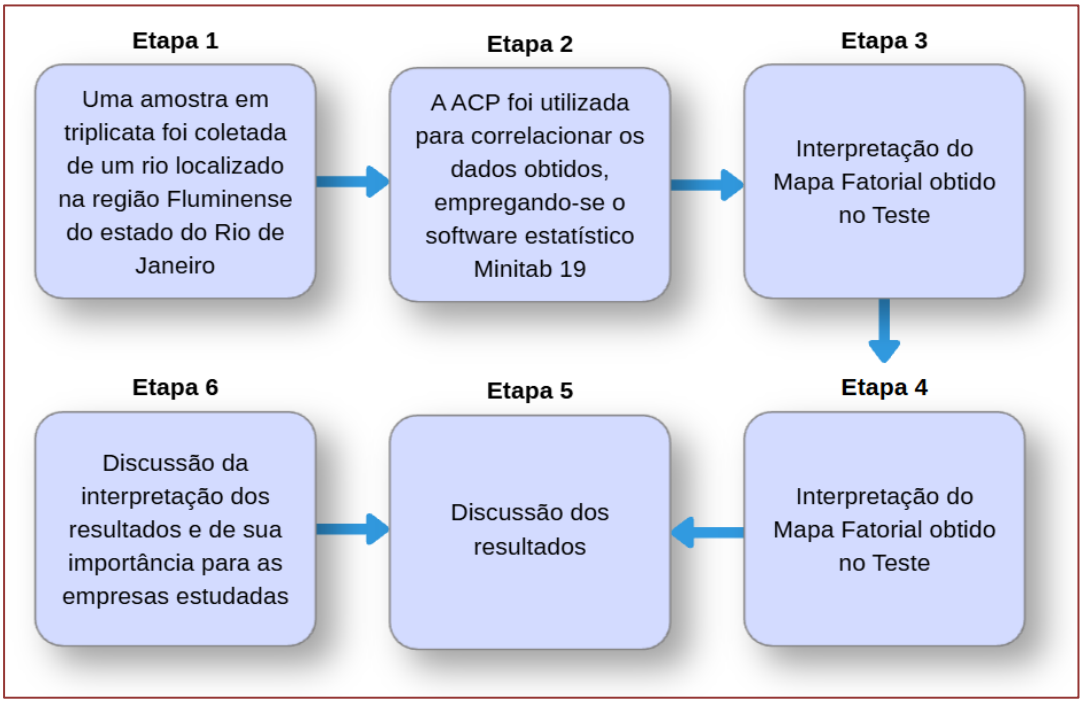
Cabe esclarecer que a ACP descreve, em termos geométricos as componentes principais, e a covariância de variáveis (nesse caso, os canais RGB) utilizando o menor número possível de autovetores. O novo subsistema passa, então, a ser composto pelos eixos das componentes principais, e as coordenadas das amostras nesses novos eixos são denominadas de *scores* (pontuações). Uma vez que cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais, os coeficientes dessas variáveis (ou seja, os autovetores) são chamados de *loadings* (Godinho et al., 2008).

Por fim, a ACP é um dos métodos mais utilizados na análise de informações, sendo empregada por sua capacidade de compreender dados decorrentes da existência de correlação entre diversas variáveis mensuradas (Coelho de Oliveira et al., 2017).

3. MÉTODOS E MATERIAIS

Este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa aplicada, uma vez que possui o objetivo de fornecer avanços à literatura atual com propósitos empíricos normativos, visando ao desenvolvimento de políticas e estratégias que aprimorem a atual situação (Bertrand & Fransoo, 2002; de Araújo et al., 2021). A abordagem do problema é quantitativa, assim como de pesquisa em modelagem e simulação. As etapas da pesquisa foram conduzidas seguindo a sequência apresentada na Figura 1.

Figura 1 Etapas do método de pesquisa



Fonte: Autores (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo a análise dos resultados obtidos no ponto amostral do rio estudado, é possível compreender de forma mais aprofundada o comportamento das variáveis associadas à água naquele local e sua inter-relações. Considerando que o ecossistema de corpos hídricos é influenciado por fatores físico-químicos e biológicos, torna-se essencial empregar ferramentas estatísticas para revelar padrões, correlações e possíveis fontes de variação entre os parâmetros monitorados.

Nesse contexto, o caso estudado apresenta a aplicação de métodos multivariados para interpretar o conjunto de dados coletados, e para identificar as tendências e potenciais indicadores de poluição no trecho estudado do rio.

Caso

O artigo apresenta um estudo de caso realizado em um ponto de um rio localizado na região do Norte Fluminense, no estado de Rio de Janeiro. As variáveis pH, SDT sólidos dissolvidos totais, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), DQO (Demanda Química de Oxigênio) e temperatura foram analisadas utilizando uma amostra coletada em triplicata.

A tabela 1 apresenta os valores médios dessas variáveis, os quais foram obtidos e tratados utilizando um Mapa Fatorial elaborado com o auxílio do *software* estatístico Minitab 19.

Tabela 1 Variáveis analisadas a partir da amostra de água coletada em triplicata

Amostra	Grupo	pH	SDT (mg/L)	Conductividade (mS/cm)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Temperatura °C
P1	A	6,8	120	134	4,5	2,5	25
P2	A	7,2	145	176	5	3,4	25,7
P3	A	7,4	152	156	4,7	3,6	25,4
Q1	B	7,8	156	179	5,6	4,5	29
Q2	B	7,6	179	147	3,6	3,5	27,8
Q3	B	7,04	147	138,4	4,3	3,3	26
Q4	B	7,5	138,4	143,3	4,8	4,1	28,3

Fonte: Autores (2026)

Esta análise foi realizada com o objetivo de compreender a relação entre as variáveis que compõem o Índice de Qualidade da Água (IQA) em um ponto do rio.

*Verificar se as coletas realmente foram nestas unidades, pois não constava a unidade na tabela

*A análise não apresenta os parâmetros para avaliação do IQA / também não está de acordo com a Resolução do CONAMA 357

Para explicar a correlação entre os poluentes no ponto estudado do rio Paraíba do Sul, foram utilizadas Estatísticas Multivariadas, mais especificamente o Mapeamento de Fatores.

O PCA é a técnica multivariada que é mais utilizada em estudos de qualidade da água, principalmente por lidar com a natureza multidimensional dos dados, reduzir dimensionalidade, e identificar agrupamentos em grandes conjuntos de parâmetros físico-químicos (Muniz at al., 2023). Portanto, esta é descrita como um método de redução de dimensionalidade que transforma diversos parâmetros correlacionados em um conjunto menor de componentes principais capaz de explicar a maior parte da alteração dos dados (Liu, et al. 2021).

Esta transformação gera nova variáveis independentes (componentes), estes por sua vez irão sintetizar o comportamento conjunto de muitos parâmetros físico-químico (Celestino et al., 2018)

Em razão disso, a aplicação do PCA ao conjunto de dados do corpo hídrico estudado, permitiu a extração de componentes que sintetizam as principais fontes de variabilidade

físico-quimica. Esta técnica permitiu isolar as covariâncias entre parâmetros como pH, SDT, DBO, DQO, Condutividade e Temperatura revelando como se comporta sob a pressão antrópica.

A tabela 2 apresenta os coeficientes de carga (*loadings*) para os primeiros componentes principais. Estes valores, são importantes para a interpretação do sistema, uma vez que indicam o peso e a direção de cada variável original na composição dos novos eixos ortogonais, permitindo assim, identificar quais parâmetros exercem maior influência na degradação ou estabilidade do ecossistema analisado.

Tabela 2 Correlações entre variáveis e os componentes principais.

Variável	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
pH	0,503	-0,176	-0,039	-0,225	-0,815	0,007
SDT (mg/L)	0,317	-0,554	0,481	-0,08	0,31	-0,509
Condutividade (mS/cm)	0,372	0,363	0,65	0,383	0,018	0,401
DBO (mg/L)	0,244	0,706	-0,071	-0,105	0,025	-0,652
DQO (mg/L)	0,5	0,062	-0,241	-0,565	0,466	0,389
Temperatura (°C)	0,446	-0,166	-0,531	0,683	0,147	-0,061

Fonte: Autores (2026)

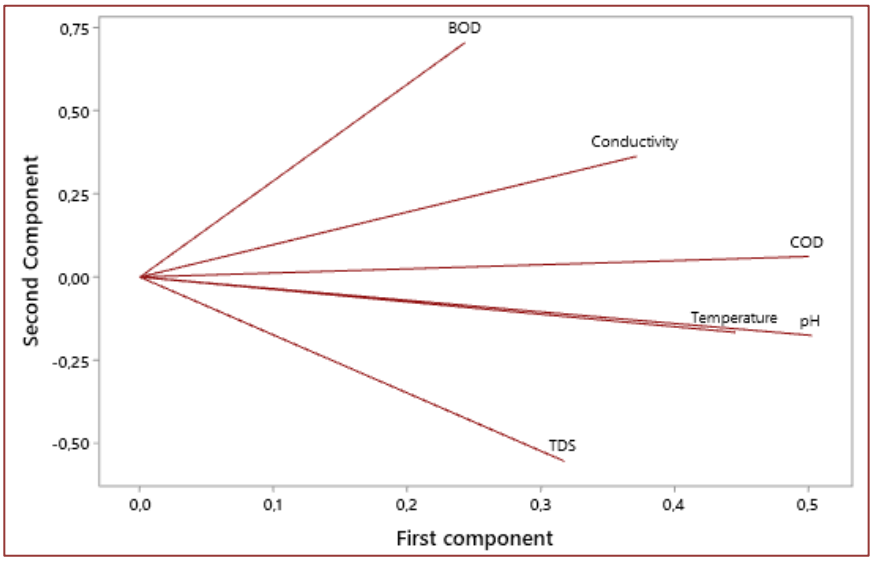
Esta tabela apresenta os coeficientes dos componentes principais. As variáveis pH, SDT, DQO e Temperatura possuem os maiores coeficientes no primeiro componente principal, resultado esperado, uma vez que as variáveis foram padronizadas e as correlações entre elas elevadas, sendo algumas bastante próximas entre si. O segundo principal componente expõe coeficientes maiores para as variáveis condutividade e DBO.

Uma vez que foram estabelecidos os pesos fatoriais na matriz de correlações (tabela 2), a transição para uma análise de cunho geo-estatística do sistema ocorre com inspeção visual do espaço fatorial. Esta representação gráfica das inter-relações permite gerar um modelo interpretável de diagnóstico ambiental, onde a proximidade e a orientação dos vetores revelam as dinâmicas de contaminação e a estrutura de interdependência dos parâmetros físico-químicos monitorados.

A Figura 2 representa o Mapa Fatorial resultante desta análise, sintetizando o comportamento do conjunto das variáveis de poluição no trecho do corpo hídrico estudado. Por meio da projeção ortogonal dos vetores, esse diagrama evidencia não somente as correlações positivas – como a influência da temperatura na aceleração das reações cinéticas que elevam a DQO e a DBO – mas também a ortogonalidade entre

determinados parâmetros, sinalizando a independência de origens ou componentes específicos de determinados poluentes.

Figura 2: Mapa fatorial com todos os componentes da poluição no local de estudo



Fonte: Autores (2026)

A análise do mapa fatorial demonstra na Fig. 2 que as variáveis o Temperatura e pH são positivamente correlacionadas com DBO, TDS e Condutividade. No entanto, TDS é não apresenta correlação significativa com a DBO devido a quase ortogonalidade entre os vetores. Tanto a Demanda Química de Oxigênio (DQO), quanto a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) aumentam com a temperatura. A DQO, que mede a quantidade total de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica, aumenta porque as reações químicas envolvidas são aceleradas à medida que a temperatura se eleva.

5.CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evidências quantitativas analisadas neste capítulo reiteram que a Estatística Multivariada, especificamente por meio da Análise de Componente Principais e da interpretação do Mapa Fatorial, vai além da mera descrição de dados, consolidando-se como uma ferramenta analítica indispensável para o diagnóstico de sistemas hídricos complexos.

Neste estudo, a ordenação das variáveis permitiu identificar que o primeiro componente principal é fortemente influenciado pelo nexo entre temperatura, pH, DBQ e SDT, o que pode evidenciar como as condições termodinâmicas do corpo d´água potencializam os processos de oxidação da matéria orgânica.

Dessa forma, a integração de diversos parâmetros físico-químicos e variáveis ambientais, bem como, a identificação de fontes e padrões de poluição, poderão orientar redes de monitoramento mais eficazes e subsidiar estratégias de gestão ambiental nos corpos hídricos.

Conclui-se que a redução da dimensionalidade dos parâmetros físico-químicos não simplificou somente a estrutura dos dados, mas revelou interdependências que a análise

univariada isolada omitiria. Para pesquisas futuras e um monitoramento ambiental de caráter preditivo, é recomendado a integração da ACP com outros métodos, tais como Análise de Agrupamentos (*Cluster Analysis),* para classificação de zonas de criticidade, bem como a aplicação do Teste da Mediana ou Modelos de Poisson com a finalidade de avaliar a sazonalidade e a frequência de eventos de degradação ambiental. Por fim, estas abordagens complementares permitirão que seja realizada uma gestão de recursos hídricos mais assertiva e fundamentada com o rigor da estatística.

REFERÊNCIAS

[1] Abraão, RP, Sampaio, NAS, Von Mühlen , C., Reis, JS da M., Colombari , CV, & Dantas, CLR (2024). Análise Bibliométrica da Qualidade da Água: Uma Perspectiva para a Preservação Ambiental. Revista de Gestão Social e Ambiental, 18 (2), e05018. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-096

[2] Akdur , H. T. K. (2022). Comparação de não paramétrico testes de pedido alternativas para medidas repetidas em blocos aleatorizados. Comunicações em Estatística: Simulação e Computação , 51 (7), 4146–4158. https://doi.org/10.1080/03610918.2020.1740262

[3] Antonio, N., Sampaio , DS, Salvador, J., Glênio , J., C, MDB, D, CPDC, E, FMG, César, L., Motta, F., & G, M. B. S. (2023). Múltiplos Resposta Otimização : Análise comparativa Entre Modelos Obtido por Ordinário Ao menos Método e Genético Programação . 1–23 . https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i8.3131

[4] Bertrand, JWM, & Fransoo , JC (2002). Metodologias de pesquisa em gestão de operações utilizando modelagem quantitativa. International Journal of Operations and Production Management , 22 (2), 241–264. https://doi.org/10.1108/01443570210414338

[5] Borges, E. J. , Abreu, L. D. de, Prates, G. UM., Brenny , G. M., Miranda Júnior, J. E. , E Sampaio, NA de S. (2024). Utilização do Processo de Poisson Não Homogêneo (Modelo de Duane) para Análise do Número de Falhas em Equipamentos Industriais. Revista de Gestão Social e Ambiental , 18 (5), e07922. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n5-188

[6] Cardoso, RP, Reis, JS da M., Sampaio, NA de S., Barros, JGM de, Barbosa, LCFM, & Santos, G. (2022). Gestão da Qualidade Sustentável: Desdobramentos , tendências e perspectivas a partir da Tripla Linha de Base. Anais de Ciências da Engenharia , 4 (3), 359–370. https://doi.org/10.24874/PES04.03.013

[7] Carvalho , C. P. de. (2023). ANÁLISE DE PAGAMENTO MÉTODOS PARA UM DOCE DISTRIBUIDOR USANDO FERRAMENTAS DE BI Cleginaldo Pereira de Carvalho A História do artigo: Painel Planilhas Google Atualmente, as empresas estão buscando mecanismos para se destacar e obter vantagem competitiva no mercado . Janeiro , 1–24. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i3.952

[8] Chakraborty , S., Agarwal , S., & Dandge , SS (2018). Análise das propriedades da fibra de algodão: uma abordagem de mineração de dados. Journal of The Institution of Engineers (India): Series E , 99 (2), 163–176. https://doi.org/10.1007/s40034-018-0125-4

[9] Celestino, A., Diego Armando Martínez Cruz, Elena Sánchez, F. Reyes, and David Soto. (2018) Groundwater Quality Assessment: An Improved Approach to K-Means Clustering, Principal Component Analysis and Spatial Analysis: A Case Study. *Water*: 10 437. https://doi.org/10.3390/w10040437.

[10] Coelho de Oliveira, H., Elias da Cunha Filho, JC, Rocha, JC, & Fernández Núñez , EG (2017). Monitoramento rápido dos atributos de qualidade da cerveja com base em dados espectrais UV-Vis. International Journal of Food Properties , 20 (julho), 1686–1699. https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1352602

[11] da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio , N. UM., de Barros, J. G. M., Cardoso, R. P., Werderits , D. E. , Santos, S. G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Contribuição de Magro Fabricação Conceitos Para Reduzindo Desperdício em Destrutivo Testando. Atas sobre Ciências da Engenharia , 5 (4), 627–636. https://doi.org/10.24874/PES05.04.005

[12] De Almeida, MDG D. , Marins, FAS, Salgado, AMP, Bittar, RDCDSM, De Barros, JM, Junior, UM. H., De Souza Sampaio, N. UM., Da Fonseca, BB, Baronto , G. N. D. , & Côrtes, ADS (2020). Modelo de mentoria de estágio industrial para educação em engenharia industrial em universidades públicas. Internacional Jornal de Engenharia Educação , 36 (1A).

[13] de Araújo, M. J. F., de Araújo, M. V. F., de Araújo, UM. H., de Barros, J. G. M., de Almeida, M. da G., da Fonseca, B. B., Reis, J. S. d. M., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio, NAS (2021). Teoria dos certificados de crédito de poluição: uma análise sobre a qualidade da gestão de resíduos sólidos no Brasil. Qualidade Inovação Prosperidade , 25 (3), 1–17. https://doi.org/10.12776/qip.v25i3.1574

[14] Derksen , C., Ledrew , E., Andarilho, UM., & Goodison , B. (2000). Inverno temporada variabilidade em Distribuição do equivalente em água da neve (SWE) nas pradarias da América do Norte e circulação atmosférica. Processos Hidrológicos , 14 (18), 3273–3290 . https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001230)14:18<3273::AID-HYP203>3.0.CO;2-W

[15] Espuny , ALG, Espuny , M., Costa, AC, da Motta Reis, JS, de Souza Sampaio, NA, Barbosa, LCFM, Santos, G., & de Oliveira, OJ (2023). Determinantes da intenção de compra de produtos orgânicos Para melhorar a qualidade da Vida. Internacional Jornal para Pesquisa de Qualidade , 17 (2), 441–454. https://doi.org/10.24874/IJQR17.02-09

[16] Febriani , RA, Park, HS e Lee, CM (2020). Um sistema baseado em regras para controle de qualidade em linhas de produção de discos de freio. Aplicado Ciências (Suíça) , 10 (18) . https://doi.org/10.3390/APP10186565

[17] Godinho, MDS, Pereira, R. O. , Ribeiro, KD O. , Schimidt , F., De Oliveira, AE, & De Oliveira, S. B. (2008). Às vezes, ele é um dos seus maiores talentos. de ss através de análise de imagens e análise de componentes principais (PCA). Química Nova , 31 (6), 1485–1489. https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000600039

[18] Gomes, F. da S., Camargo, P. R., Reis, J. S. da M., Diogo, G. M. M., Cardoso, R. P., Barros, J. GM de, Sampaio, NA de S., Barbosa, LCFM, & Santos, G. (2022). Os principais benefícios da aplicação do Seis Sigma para a excelência produtiva. Qualidade Inovação Prosperidade , 26 (3), 151–167 . https://doi.org/10.12776/qip.v26i3.1712

[19] Gomes, F. M., Ymamura , C. S., de Souza Sampaio, N. UM., Pereira, F. M., Andrade, H. de S., & Silva, MB (2023). Otimização de processos de resposta múltipla usando diferentes técnicas de modelagem . Qualidade, Inovação e Prosperidade , 27 (3), 18–36. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I3.1899

[20] Junior, AM da C., Barros, JGM de, Almeida, M. da G. D. de, Carvalho, CP de, & Sampaio, NA de S. (2023). Aplicativo de o peixe distribuição no previsão de o número de defeitos em um têxtil fábrica aplicação da distribuição de peixe n / D previsão do número de defeitos em uma fábrica têxtil . 14 (8), 14378–14386. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i8.2671

[21] Leoni, RC, de Souza Sampaio, N. UM., & Corrêa, S. M. (2017). Multivariado análise aplicado para estudo da qualidade do ar . Revista Brasileira de Meteorologia , 32 (2). https://doi.org/10.1590/0102-77863220005

[22] Leoni, Roberto Campos, de Souza Sampaio, NA, & Corrêa, SM (2017). Estatística Multivariada Aplicada ao se da Qualidade fazer Ar. Revista Brasileira de Meteorologia , 32 (2), 235–241. https://doi.org/10.1590/0102-77863220005

[23] Liu, Junzhao, Dong Zhang, Qiuju Tang, Hongbin Xu, Shanheng Huang, D. Shang, and Ruxue Liu. (2021) Water quality assessment and source identification of the Shuangji River (China) using multivariate statistical methods. *PLoS ONE* 16. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245525.

[24] Mazza , FC, de Souza Sampaio, NA, & von Mühlen , C. (2022). Método de hipervelocidade para análise de pesticidas organoclorados em sedimentos usando cromatografia gasosa bidimensional – espectrometria de massa com tempo de voo. Analítico e Bioanalítica Química , 0123456789. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04464-y

[25] Mazza , FC, Lima, AC da S., Sampaio, NA de S., De Almeida, M. da G. D. , Miranda Junior, J. E. , & De Abreu, LD (2024). Resultados Preliminares do Tratamento de Spadns por Eletrofloculação Com eletrodos de ferro. Revista de Gestão Social e Ambiental , 18 (1), e04784. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n1-068

[26] Muniz, D. H. F., and E. Oliveira-Filho. (2023) Multivariate Statistical Analysis for Water Quality Assessment: A Review of Research Published between 2001 and 2020. *Hydrology* . https://doi.org/10.3390/hydrology10100196.

[27] Peeters , JP e Martinelli , JA (1989). Análise de agrupamento hierárquico como ferramenta para gerenciar a variação em coleções de germoplasma . Teórico e Aplicado Genética , 78 (1), 42–48 . https://doi.org/10.1007/BF00299751

[28] Reis, JSDM, Silva, DE W. , Sampaio, NA de S., Barros, JGM de, Santos, G., & Barbosa, LCFM (2024). Os benefícios do FMEA na melhoria do processo industrial de uma transportadora aérea de cabine. Processos sobre Engenharia Ciências , 6 (3), 1031–1040 . https://doi.org/10.24874/PES06.03.016

[29] Sales, JP de, Reis, JS da M., Barros, JGM de, Fonseca, BB da, Junior, AH de A., Almeida, M. da G. D. de, Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio, N. UM. de S. (2022). Qualidade Gerenciamento no Contornos de Contínuo Produto Melhoria. Revista Internacional de Pesquisa em Qualidade , 16 (3), 689–702. https://doi.org/10.24874/IJQR16.03-02

[30] Sampaio, NAS, Mazza , FC, Siqueira, SSS de, Miranda Junior, J. E. , Moutinho, JV de S., & Pacífico, L. de O. (2024). Aplicações de Correlação Análise em Problemas Ambientais . Revista de Gestão Social e Ambiental , 18 (3), e04925. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-085

[31] Sampaio, Nilo Antônio de Souza, Carvalho, E. , Almeida, M. da GD de, Barros, JGM de, Junior, J. E. M., Paula, E. R. M. de, & Prata, D. S. (2025). CANDIDATURA O HUMOR

[32] TESTE DA MEDIANA PARA UM PROBLEMA AMBIENTAL. Revista de Gestão Social e Ambiental , 19 (2). https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n2-046

[33] Sampaio, Nilo Antonio de Souza, Júnior, JEM, Almeida, M. da G. D. de, Abreu, LD de, & Cardoso, RP (2024). Aplicações de Análise Fatorial e Metodologia de Superfície de Resposta em Problemas de Otimização de Processos Químicos. Revista Internacional de Negócios Profissionais , 9 (1), 1–14. https://doi.org/10.26668/businessreview/2024.v9i1.4284

[34] Semagn , K., Bjornstad , A., Stedje , B., & Bekele , E. (2000). Comparação de métodos multivariados para a análise de recursos genéticos e adaptação em Phytolacca dodecandra usando RAPD. Teórico e Aplicado Genética , 101 (7), 1145–1154 . https://doi.org/10.1007/s001220051591

[35] Silva, ACP da, Pasini , V. D. , Aguilera, MVC, Fonseca, BB da, Sampaio, NA de S., Reis, JS da M., Santos, G., & Barbosa, LCFM (2023). Mapeamento de acidentes e condições inseguras de trabalho no setor automotivo. Quality Innovation Prosperity , 27 (2), 139–157. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I2.1849

[36] Vasconcelos , TR de O., Savi , AF, Prates, GA, Brenny , GM, Galli , LC do LA, & Sampaio , NA de S. (2024). Como realizar uma análise estatística de dados de degradação não destrutiva Estudar o crescimento de fissuras em pás eólicas em função de o Número de Ciclos. Revista de Gestão Social e Ambiental , 18 (7), e08192. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-169

[37] Xiaoxue, Lachun Wang, Hong Yang, Na Li, and Chang Gong. (2020) Spatiotemporal Analysis of Water Quality Using Multivariate Statistical Techniques and the Water Quality Identification Index for the Qinhuai River Basin, East China. *Water* https://doi.org/10.3390/w12102764.

[38] Zhang, Han, Hongfei Li, Dongdong Gao, and Haoran Yu. (2021) Source identification of surface water pollution using multivariate statistics combined with physicochemical and socioeconomic parameters. *The Science of the total environment* : 151274
. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151274.

Capítulo 6

A dinâmica da pecuária e a pressão ambiental: uma análise dos frigoríficos e do desmatamento em Rondônia

Isabela Soster da Pont
Jonathan Gonçalves da Silva
Roselaine Bonfim de Almeida
Leandro Vinícios Carvalho

Resumo: O presente artigo busca caracterizar o desenvolvimento da pecuária e o desmatamento no estado de Rondônia, assim como contribuir com alternativas para mitigar os impactos ambientais causados pela cadeia produtiva da carne nesse estado. Mais especificamente, pretende-se identificar os principais eixos de desmatamento e avaliar as mudanças no uso e cobertura da terra no estado, destacando a conversão de áreas de florestas em pastagens. Para isso, foram desenhados mapas através da ferramenta geoespacial QGIS (versão 3.40.5), destacando a distribuição espacial dos frigoríficos, a cobertura e o uso da terra e dados socioeconômicos da atividade pecuária no estado. Os resultados apontam que a localização dos frigoríficos no estado de Rondônia está fortemente associada às áreas mais desmatadas que são formadas por áreas de pastagens. Por fim, com as exigências internacionais e a crescente pressão interna das indústrias da cadeia produtiva da carne, os frigoríficos podem estar se direcionando para um caminho em direção a operar em conformidade ambiental. Tais iniciativas são delineadas a partir dos compromissos públicos ambientais assumidos pelos frigoríficos e pela atuação estratégica do setor público e privado.

Palavras-chave: Agropecuária. Bioeconomia. Desmatamento. Frigoríficos. Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) estima que cerca de 90% do desmatamento tropical ocorreu devido à expansão das atividades da agropecuária (FAO, 2021). Na Amazônia Legal a expansão da agropecuária tem avançado em direção à floresta, movimentando o chamado Arco do Desmatamento, onde são observadas as maiores taxas de desflorestamento no bioma Amazônia. O Arco do Desmatamento abrange os estados do Maranhão, Pará, Mato Grosso, Rondônia e Acre, no entanto, o avanço da fronteira agrícola tem atingido o sul do Amazonas, ameaçando uma grande porção de floresta densa (ISA, 2019; IBGE, 2010).

Embora o uso da terra na região compreendida pela Amazônia Legal seja frequentemente associada às vantagens comparativas do país, sobretudo devido à sua extensão territorial e a possibilidade de exploração econômica da terra, essa perspectiva desconsidera a ausência de fiscalização eficaz e a má gestão das terras públicas. Essa combinação de fatores resulta nas altas taxas de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Silva; Gurgel, 2012). Diante disso, a pecuária no bioma Amazônia cresceu nas últimas décadas impulsionada pela disponibilidade de terras a baixo custo e pela maior lucratividade da criação em larga escala, tornando o investimento no setor mais atrativo (Imazon, 2015).

O estado de Rondônia, localizado na região norte do Brasil, faz parte do bioma Amazônia e possui, a partir de um arcabouço legal, obrigações de proteção ambiental para o desenvolvimento econômico e sustentável da região. O projeto de expansão das atividades econômicas no estado foi fomentado pelo governo militar com o objetivo de conter a pressão pela Reforma Agrária no país na década de 1970, o que impulsionou o estabelecimento de migrantes de diversas regiões que viram a oportunidade de possuir e explorar as terras no estado (Bevilaqua, 2020; Ângelo; de Sá, 2007).

Inicialmente, a atividade econômica que foi mais explorada foi a da extração de madeiras, por ser uma atividade que possuía um alto valor de mercado para venda, e que serviria para o financiamento do desmatamento da área com o propósito de abertura de pastagens para a agricultura e para a criação de gado (Veríssimo *et al.*, 1995). O desflorestamento incentivado pelo governo através dos projetos de colonização, com propósito do desenvolvimento de cultivos agrícolas e da atividade pecuária, ancorou o crescimento das taxas de desmatamento em Rondônia até 2004. A partir desse período, fatores econômicos, como a redução nos preços dos produtos agropecuários e a implementação de políticas públicas pelo governo federal, sendo a intensificação da fiscalização e a criação de programas de combate ao desmatamento, refletiram uma queda de 40% dessa taxa (Soares Filho *et al.*, 2009). No entanto, o desmatamento voltou a crescer a partir de 2010. Esse aumento se deu em grande parte por invasões de terras públicas, terras pertencentes aos povos originários e menor controle e fiscalização das unidades de conservação (IPAM; ISA; Imazon, 2014; Alencar *et al.*, 2022).

Em razão disso, a exploração e a degradação dessas áreas são acompanhadas de práticas lucrativas, inicialmente, pela comercialização da madeira ilegal proveniente da área e, posteriormente, para ser usada para a pecuária extensiva. Dessa maneira, a cadeia produtiva da carne no estado cresce, em grande parte, em áreas protegidas, como unidades de preservação e terras indígenas. O destino dessa produção muitas vezes é o mercado agroexportador brasileiro, o que acaba por contaminar as cadeias de suprimento (West *et al.*, 2022).

Com isso, alguns questionamentos são válidos para o debate sobre o desmatamento no estado, como a questão de qual poderia ser a relação entre a expansão da pecuária e o

desmatamento no bioma Amazônia e de que forma a concentração de frigoríficos no estado de Rondônia pode influenciar na dinâmica do desmatamento no estado. Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo caracterizar o desenvolvimento da pecuária e a evolução do desmatamento no estado de Rondônia. Mais especificamente, pretende-se: i) identificar os principais eixos de desmatamento no estado; ii) avaliar as mudanças no uso e cobertura da terra no estado, destacando a conversão de áreas de florestas em áreas de pastagens.

Além disso, este estudo contribui para a formulação de alternativas voltadas à mitigação dos impactos ambientais provocados pela cadeia produtiva da carne. Ao evidenciar a relação entre a localização dos frigoríficos, a expansão da pecuária e o avanço do desmatamento no estado de Rondônia, a pesquisa oferece elementos que podem orientar a formulação de políticas públicas para o estado. Dessa forma, os resultados obtidos têm o potencial de apoiar iniciativas voltadas à conciliação entre desenvolvimento econômico e conservação ambiental para toda a Amazônia Legal.

Para isso, a pesquisa utiliza dados secundários e ferramentas de georreferenciamento com o intuito de visualizar a distribuição espacial dos frigoríficos no território de Rondônia e sua proximidade com áreas que apresentam maior intensidade de desmatamento, o uso e cobertura da terra, e o volume de exportações, possibilitando a construção de mapas temáticos.

O trabalho está organizado, para além desta introdução, em outras quatro seções. A seção seguinte detalha a metodologia utilizada e a base de dados. A terceira seção caracteriza a atividade pecuária no estado de Rondônia, com foco na discussão da relação entre o desmatamento e a cadeia produtiva da carne. A quarta seção é dedicada aos caminhos para a conformidade ambiental no estado de Rondônia apoiada na literatura e em questões locais. Por fim, a última seção apresenta as considerações finais do trabalho.

2. METODOLOGIA

Com o intuito de responder os objetivos propostos e de caracterizar a dinâmica da pecuária e do desmatamento no estado de Rondônia, esta pesquisa faz uso de dados secundários e de ferramentas de geoprocessamento. O Quadro 1 apresenta as fontes dos dados utilizados para o desenvolvimento do estudo.

Quadro 1. Fontes de dados utilizados

Tipo de dado	Descrição	Fonte	Ano
Localização de frigoríficos e abatedouros	Coordenadas e registro de unidades ativas no estado de Rondônia	Idaron (Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril)	2023
Malha municipal	Delimitação geográfica dos municípios de Rondônia	IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)	2023
Uso e cobertura da terra	Classificação do uso da terra (floresta, pastagem, etc.)	TerraClass	2022
Volume de exportações de carne bovina	Informações sobre exportações da cadeia bovina no estado	Sistema Agrostat (Ministério da Agricultura)	Ano específico ou média histórica

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Conforme apresentado no quadro, foram utilizadas bases de dados públicas contendo informações a respeito da localização dos frigoríficos e abatedouros de carne bovina ativos no estado de Rondônia, coletadas a partir da divulgação da Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril do estado de Rondônia (Idaron, 2023). Além disso, para realizar o cruzamento de dados foi necessário a utilização de dados da malha municipal do estado, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e dados referentes ao uso e cobertura da terra coletados a partir de dados do TerraClass. Por fim, foram utilizados dados relacionados ao volume de exportação, que foram retirados do Sistema Agrostat.

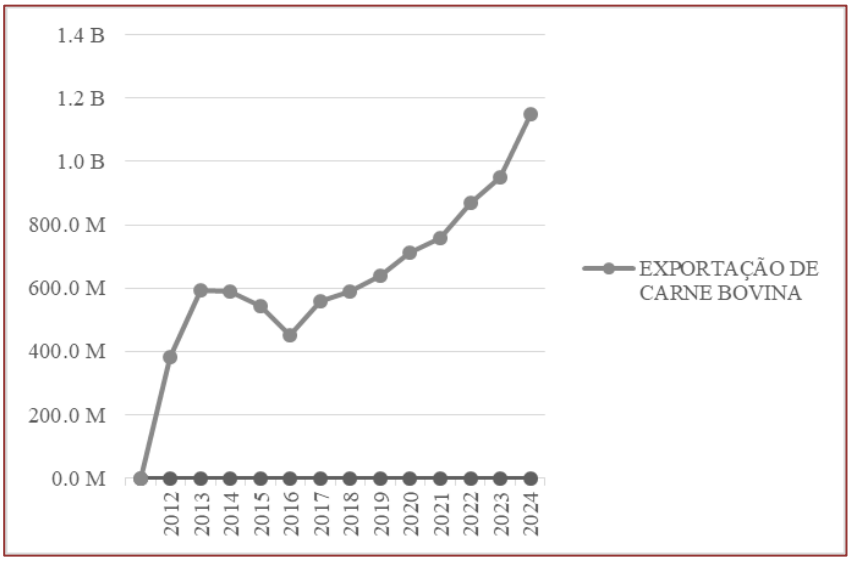
Com isto, os dados foram cruzados através do software QGIS, versão 3.40.5, (2025) permitindo a construção do mapa de densidade de Kernel, ferramenta de análise espacial que verifica o comportamento de padrões, isto é, a intensidade de um fenômeno na região do estudo. A construção do mapa possibilitou identificar os polos de maior concentração da indústria frigorífica, evidenciando áreas de pressão ambiental significativas associadas à cadeia produtiva da carne no estado.

3. CARACTERIZAÇÃO DA PECUÁRIA NO ESTADO DE RONDÔNIA

A partir do que foi exposto é possível observar que as atividades agropecuárias se tornaram centrais para a economia do estado, sendo que o Valor Bruto da Produção Agropecuária (VBP) de Rondônia, em 2022, atingiu 20,9 bilhões de reais, sendo que, somente a pecuária representa 10,7 bilhões de reais desse montante, representando 51,19% (Seagri, 2023). Nesse mesmo ano, o estado registrou um rebanho bovino de 17,6 milhões de cabeças (Idaron, 2023). Esse número expressivo pode ser interpretado como resultado da certificação internacional do estado como Área Livre de Febre Aftosa, com vacinação em 2013, que posteriormente, em 2021, possibilitou a suspensão da vacinação, a qual acabou atraindo empresas frigoríficas e aumentando a capacidade de abate no estado (Pfeifer *et al.*, 2021).

A partir da Figura 1 é possível observar a evolução das exportações de carne bovina de gado proveniente do estado de Rondônia, para se ter uma ideia de quanto a carne bovina da região tem crescido em relação ao seu acesso aos mercados internacionais.

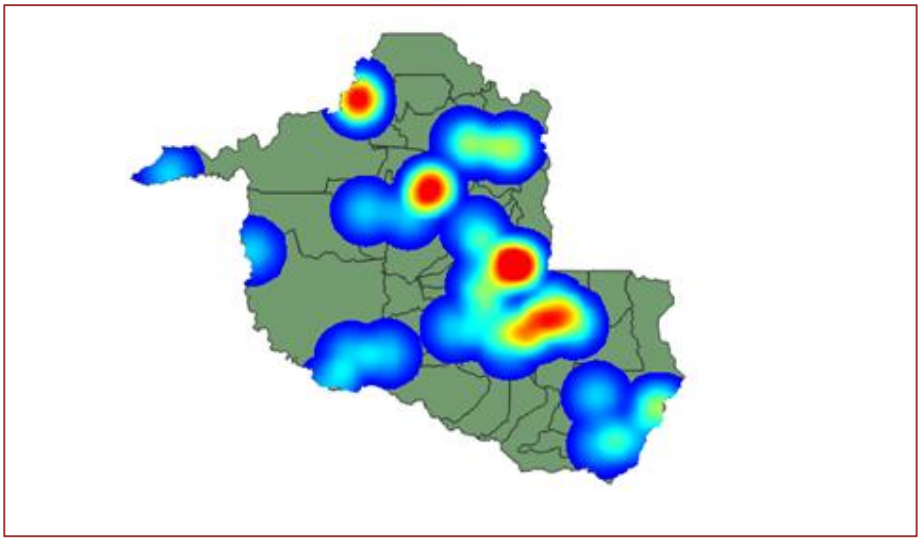
Figura 1 – Evolução da exportação de carne bovina no estado de Rondônia em US$ entre os anos de 2012 e 2024



Fonte: Dados do Agrostat.

A evolução da exportação de carne bovina no estado de Rondônia acompanha essa tendência de aumento na capacidade de abate apontada pela literatura. Além disso, o reconhecimento internacional e a fiscalização eficiente da Agência Sanitária do estado levou ao aumento do volume de exportação no estado a partir de 2017. Nesse sentido, Vale *et al*. (2022) estimam que a formação de *clusters* de frigoríficos no bioma Amazônia se iniciou na década de 1990, estimulados pela oferta crescente de gado na região. Para investigar a formação desses *clusters* foi realizado um estudo para identificar a distribuição dos frigoríficos no estado, que segue apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Mapa de calor da distribuição de frigoríficos em Rondônia

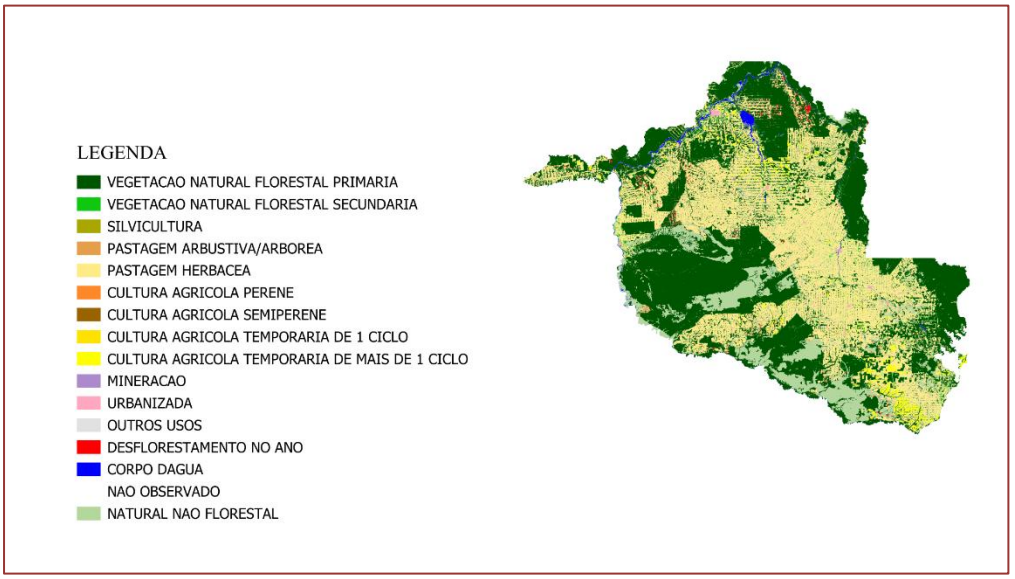


Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do IBGE – Malha Municipal (2023) e IDARON – Estabelecimentos registrados no SIE/RO (2023).

A Figura 2 representa a densidade espacial dos frigoríficos no estado de Rondônia. O mapa foi gerado a partir da estimativa de densidade de Kernel. As áreas em vermelho destacam as regiões de maior concentração de frigoríficos, enquanto as áreas em azul representam menor densidade. A concentração dos frigoríficos na região central, em direção ao norte do estado, se dá devido ao maior número de rebanho bovino nesta região. O sul do estado tem como característica o cultivo de lavouras de soja, devido a logística de escoamento de grãos favorável para a região (Pfeifer *et al.*, 2021).

Um dos objetivos do presente trabalho é entender a dinâmica da localização dos frigoríficos em perspectiva das áreas desmatadas no estado de Rondônia. Assim, o que se visa é entender como o uso e cobertura da terra no estado evidencia que a localização dos frigoríficos no estado de Rondônia está associada às áreas mais desmatadas, que são as formadas por áreas de pastagens. Para isso, na Figura 3 se apresenta a relação de cobertura da vegetação no estado.

Figura 3 – Mapa de Uso e Cobertura da terra em Rondônia



Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do TerraClass (2022).

Dessa forma, comparando a Figura 2 com a Figura 3 há um indicativo de que a cadeia produtiva da carne bovina pode ter influência direta na conversão de vegetação nativa em áreas de pastagens. Observa-se que há um predomínio de desmatamento na região central do estado de Rondônia, onde se concentra o maior número de rebanho bovino do estado, portanto, coincide com a zona de expansão da fronteira agropecuária marcada por grandes áreas convertidas em pastagens. A Figura 2, que apresenta a distribuição espacial dos frigoríficos, evidencia que a localização dessas indústrias está igualmente concentrada nessa porção do território. Com isso, a sobreposição das figuras indica uma relação entre a cadeia produtiva da carne e o desmatamento, desencadeado pela demanda por áreas para criação de gado.

Para além do desmatamento em propriedades privadas, Pedlowski *et al.* (2005) apontavam que a ocupação de áreas protegidas em Rondônia acabaria se tornando novas fronteiras agrícolas. Nesse contexto de grande exportador surge a relação com o aumento

da atividade agropecuária ilegal. Como exemplo tem-se a Reserva extrativista de Jaci-Paraná, que tem 74% de sua área de reserva ocupada por atividades agropecuárias, cerca de 216 mil cabeças de gado, ficando entre as dez áreas de conservação mais desmatadas do Brasil (InfoAmazonia, 2024).

Ademais, o relatório Radar Verde (2023) indicou que 92% dos frigoríficos atuantes na Amazônia Legal possuem um controle muito restrito da sustentabilidade da cadeia produtiva. Além disso, 96% da capacidade de abate bovino da região está altamente exposta ao risco de aquisição de gado proveniente de áreas de desmatamento (Radar Verde, 2023). De acordo com os dados do *software* Trase, em 2020 o estado de Rondônia ocupava o quarto lugar na produção de carne com exposição a áreas desmatadas do Brasil, sendo Porto Velho, capital de Rondônia, a sexta cidade com maior produção de carne com exposição a áreas desmatadas do Brasil (Trase, 2020).

Nessa perspectiva, a atuação socioambiental responsável dos mais de 40 abatedouros de gado de corte no estado é fundamental para a contenção do desmatamento, que está diretamente correlacionado ao setor pecuário. Assim, na próxima seção serão levantados alguns pontos que podem fazer com que o estado caminhe para uma melhor gestão das cadeias produtivas de carne bovina em relação à questão da sustentabilidade e de garantias de produção de carne de áreas não provenientes de desmatamento.

4. CAMINHOS PARA A CONFORMIDADE AMBIENTAL NA CADEIA DA CARNE NO ESTADO DE RONDÔNIA

As exigências internacionais por modelos de produção sustentáveis, aliadas à crescente pressão interna - notadamente de instituições como o Ministério Público Federal (MPF) -, têm delineado caminhos para a conformidade ambiental nas cadeias de produção do complexo agroindustrial. Nesse contexto, impõe-se aos frigoríficos, sobretudo, aqueles em que as atividades de exportação são mais intensas, a responsabilidade de assegurar uma produção isenta de áreas de produção com desmatamento ilegal e de práticas de trabalho análogo à escravidão (Monitor, 2022).

Nesse cenário, a responsabilização dessas empresas a partir do comprometimento público reforça a busca pela sustentabilidade nos diferentes segmentos da cadeia produtiva e um dos instrumentos que o MPF tem para reforçar esse comprometimento são as assinaturas de compromissos, bem como a estruturação de um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC). O TAC da Carne, que se iniciou em 2009, fomenta a transparência da cadeia de carne, visando a rastreabilidade do gado avaliada por meio de auditorias, além de tratar de compromissos sociais como a verificação de direitos trabalhistas na propriedade que foi realizada a aquisição de gado. O TAC da carne, desenvolvido pelo próprio MPF, possui uma metodologia de auditoria robusta e de maior confiabilidade em seu processo, se tratando da revisão e acompanhamento pelo Órgão Federal (Armelin *et al.*, 2020).

Além do Termo de Ajustamento de Conduta, o Compromisso Público da Pecuária (CPP), desenvolvido pela Organização Não Governamental Ambiental *Greenpeace*, que tem como característica a voluntariedade, compõe uma iniciativa de comprometimento público do frigorífico em produzir usando práticas de não agressão ambiental. No entanto, o CPP, que fora ratificado pelas maiores empresas da cadeia produtiva da carne no país, Minerva Foods, Marfrig e JBS, atualmente não conta com o acompanhamento da ONG na implementação do Compromisso Público. Essa condição, ocasionada pelas falhas de monitoramento e desmobilização das empresas envolvidas, enfraqueceu o acordo e o seu

potencial de reduzir os crimes de ordem ambiental (Armelin *et al.*, 2020; Greenpeace, 2017).

Nesse sentido, a literatura oferece soluções baseadas na necessidade das instituições de agirem em conformidade com as leis através da sua responsabilidade socioambiental, compreendidas através do conceito de *compliance* ambiental (Castro, 2021). O *compliance* ambiental tem sido tratado pela literatura como uma solução aos impasses e inações de estados, organizações e empresas quanto às leis e responsabilidades socioambientais. Na esfera privada, tratando das indústrias frigoríficas, o *compliance* regula a cadeia da carne em alinhamento com acordos públicos e leis ambientais. As próprias empresas têm adotado mecanismos em sua gestão interna de modo a identificar fragilidades e criar procedimentos que garantam a integridade da gestão.

Skidmore *et al.* (2020), em seu estudo, trataram dos avanços no monitoramento de fornecedores diretos de gado para as indústrias como resultado de esforços relacionados a procedimentos de *compliance* e *à* redução nas taxas de desmatamento no bioma Amazônia, decorrente de Acordos Públicos. Os autores compilaram dados da Guia de Transporte Animal (GTA) e registros de propriedades, delimitando áreas de fornecedores diretos e indiretos, para compreender o desmatamento no bioma e o impacto dos mecanismos de *compliance* após os Acordos Públicos da Pecuária. Com isso, concluíram que para atingir metas de desmatamento zero, mais frigoríficos deveriam aderir aos acordos e que é necessário ampliar o monitoramento da cadeia produtiva, visto que, propriedades não monitoradas estavam mais suscetíveis às atividades vinculadas ao desmatamento.

O monitoramento da cadeia de carne é um procedimento de *compliance* que busca reduzir os riscos de os frigoríficos adquirirem carne proveniente de áreas desmatadas. Além disso, os acordos públicos são fundamentais para a implementação dessas ações. Dessa forma, o estudo realizado por Gibbs *et al. (*2016) evidenciou como esses acordos contribuíram na construção de arcabouços e o aumento de registros de áreas. Por meio da pesquisa foi possível observar que a ação dos frigoríficos de excluir fornecedores de gado com propriedades desmatadas serve como um indicativo de redução de mercado para pecuaristas ambientalmente irregulares. No entanto, esse processo, bem como já citado, falha ao desprezar fornecedores indiretos ou a possível lavagem de gado.

Contudo, o estado de Rondônia pouco avançou no emprego de compromissos públicos. Os frigoríficos, em grande maioria, não possuem controle estatal em suas ações, visto que o TAC possui baixa aceitação por parte das empresas. De acordo com ferramentas como o Monitac e a Boi na Linha, somente a JBS se comprometeu via TAC e CPP no estado de Rondônia, tendo suas quatro plantas frigoríficas auditadas. Por outro lado, as empresas Minerva Foods e Marfrig se comprometeram apenas via CPP, sendo somente a Minerva Foods responsável por auditorias internas.

Conforme explicitado pela literatura, os acordos públicos são caminhos eficientes para a conformidade ambiental quando possuem participação ativa do setor privado. Ao buscar contornar a baixa aceitação do TAC no estado de Rondônia, este estudo aponta a importância de fomentar mecanismos de governança que envolvam a aproximação entre o poder público e o setor privado. Incentivar a assinatura de acordos ambientais - inclusive como medida de resolução judicial para empresas envolvidas em infrações ambientais - pode caracterizar não somente uma maneira de responsabilizá-los, mas também uma oportunidade estratégica para ampliar a rastreabilidade e transparência na cadeia produtiva da carne.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo caracteriza o desenvolvimento da pecuária e do desmatamento no estado de Rondônia, bem como contribui com caminhos para mitigação dos impactos ambientais causados pela cadeia produtiva da carne.

Os resultados demonstram uma convergência na localização das indústrias frigoríficas com as áreas mais desmatadas do estado de Rondônia, que são as áreas de pastagens. Isso evidencia a pecuária como principal vetor de desmatamento. Os caminhos para a conformidade ambiental na cadeia produtiva da carne giram em torno da responsabilização das indústrias frigoríficas dos danos ambientais que a atividade ocasiona. A parceria da iniciativa pública e do setor privado pode surgir como alinhamento estratégico para assegurar a principal atividade econômica e fornecer garantia de um desenvolvimento sustentável e consciente.

REFERÊNCIAS

[1] AGROSTAT. Estatística de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro. [*S. l.*], 2024. Disponível em: https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Agrostat/Agrostat.html. Acesso em: 21 mar. 2025.

[2] ALENCAR, A.; SILVESTRINI, R.; GOMES, J.; SAVIAN, G. Amazônia em chamas: o novo e alarmante patamar do desmatamento na Amazônia. IPAM Amazônia, [*s. l.*], 2022. Disponível em: https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2022/02/Amaz%C3%B4nia-em-Chamas-9-pt_vers%C3%A3o-final-2.pdf. Acesso em: 25 jun. 2024.

[3] ÂNGELO, H.; DE SÁ, S. P. P. O desflorestamento na Amazônia brasileira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, ed. 3, p. 217-227, 2007. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/1953/1207. Acesso em: 14 mai. 2024.

[4] ARMELIN, M. J. Capóssoli *et al*. TAC da Carne no Pará e Compromisso Público da Pecuária: A importância da rastreabilidade da carne na redução dos desmatamentos na Amazônia. **Amigos da Terra**, [*s. l.*], 28 mar. 2022.

[5] BEVILAQUA, R. L. P. A grilagem de terras e a reforma agrária no estado de Rondônia. Associação Nacional dos Procuradores da República, [*s. l.*], 2020. Disponível em: https://www.anpr.org.br/artigos/a-grilagem-de-terras-e-a- reforma-agraria-no-estado-de-rondonia. Acesso em: 7 mar. 2024.

[6] CASTRO, F. P. A Construção Do Compliance Ambiental No Brasil Por Um Viés ético. 104f. Dissertação (Mestrado em Direito Negocial) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021. Disponível em: https://repositorio.uel.br/srv-c0003-s01/api/core/bitstreams/c5c40a75-5b04-4567-adbe-40b1eb138d2f/content. Acesso em: 1 set. 2024.

[7] FAO. COP26: Agricultural expansion drives almost 90 percent of global deforestation. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, [*S. l.*], 6 nov. 2021. Disponível em: https://www.fao.org/newsroom/detail/cop26-agricultural-expansion-drives-almost-90-percent-of-global-deforestation/en. Acesso em: 26 mar. 2025.

[8] GIBBS, H. K.; MUNGER, J.; L'ROE, J.; BARRETO, P.; PEREIRA, R.; CHRISTIE, M.; AMARAL, T.; WALKER N. F. Did Ranchers and Slaughterhouses Respond to Zero- Deforestation Agreements in the Brazilian Amazon?. **Conservation Letters**, [s. l.], 2016. Disponível em: https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/conl.12175. Acesso em: 10 jul. 2024.

[9] GREENPEACE. Após escândalos, Greenpeace suspende participação no Compromisso da Pecuária. **Greenpeace**, [*S. l.*], p. -, 6 jun. 2017. Disponível em: Após escândalos, Greenpeace suspende participação no Compromisso da Pecuária. Acesso em: 27 mar. 2025.

[10] IBGE. Malha Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, [*S. l.*], 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html. Acesso em: 21 mar. 2025.

[11] —— . Mapas Vegetação. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, [*S. l.*], 2010. Disponível em:

https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/unidades_da_federacao/am_vegetacao.pdf. Acesso em: 30 mar. 2025.

[12] IDARON. Estabelecimentos registrados no SIE/RO. [*S. l.*], 2023. Disponível em: https://www.idaron.ro.gov.br/wp-content/uploads/2023/02/ESTAB.-SIE-2023-ATUALIZADO.pdf. Acesso em: 24 mar. 2025.

[13] —— . Rondônia é destaque nacional com maior rebanho bovino dentro das áreas livres de aftosa sem vacinação. Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril do Estado de Rondônia, [s. l.], 11 nov. 2023. Disponível em: https://rondonia.ro.gov.br/rondonia-e-destaque-nacional-com-maior-rebanho-bovino-dentro-das-areas-livres-de-aftosa-sem-vacinacao/#:~:text=A%20pecu%C3%A1ria%20de%20Rond%C3%B4nia%20tem,de%20febre%20aftosa%20sem%20vacina%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 19 jun. 2024.

[14] IMAZON. Pecuária na Amazônia: Tendências e Implicações para a Conservação Ambiental. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, [s. l.], 25 nov. 2015. Disponível em: https://imazon.org.br/pecuaria-na-amazonia-tendencias-e- implicacoes-para-a-conservacao-ambiental/. Acesso em: 2 abr. 2024.

[15] INFOAMAZONIA. Agropecuária ilegal triplica em 10 anos na Resex Jaci-Paraná, em Rondônia. InfoAmazonia, [*s. l.*], 16 jan. 2024. Disponível em: https://infoamazonia.org/2024/01/16/agropecuaria-ilegal-triplica-em-10-anos-na- resex-jaci-parana-em-rondonia/#:~:text=Atualmente%2074%25%20do%20solo%20da,de%20floresta%20dentro%20da%20Reserva. Acesso em: 28 jun. 2024.

[16] IPAM, ISA, & IMAZON. O Aumento no Desmatamento na Amazônia em 2013: um ponto fora da curva ou fora de controle? [s. l.], 2014. Belém. Disponível em: https://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/outros/Aumento%20no%20Desmatamento%20na%20Amazonia%20em%202013.pdf. Acesso em: 28 jun. 2024.

[17] ISA. Novo arco do desmatamento: fronteira de destruição avança em 2019 na Amazônia. **Instituto Socioambiental**, [*S. l.*], 17 dez. 2019. Disponível em: https://site-antigo.socioambiental.org/pt-br/noticias-socioambientais/novo-arco-do-desmatamento-fronteira-de-destruicao-avanca-em-2019-na-amazonia. Acesso em: 28 mar. 2025.

[18] MONITAC. Frigoríficos. [*S. l.*], 2020. Disponível em: https://monitac.oeco.org.br/wordpress/?page_id=162. Acesso em: 10 fev. 2024.

[19] MONITOR. De olhos fechados para o desmatamento. Repórter Brasil, [*s.l.*], 2022. Disponível em: https://reporterbrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/220902-Monitor-Pecuaria-PT-06.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

[20] PEDLOWSKI, M. A.; MATRICARD E. A. T.; SKOLE, D.; CAMERON, S. R.; CHOMENTOWSKI, W.; FERNANDES, C.; LISBOA, A. Conservation units: A new deforestation frontier in the Amazonian state of Rondônia, Brazil. **Environmental Conservation**, [*s. l.*], 2005.

[21] PFEIFER, L. F. M.; SALMAN, A. K. D.; TABORDA, J. M. M.; SILVA, G. M.; ANDRADE, J. S.; ARAUJO, L. V.; SOUZA, V. L.; TEIXEIRA, O. S. Caracterização da Pecuária em Rondônia. In: SALMAN, A. K. D.; SCHLINDWEIN, J. A.; PFEIFER, L. F. M. (org.). Avanços da pecuária na Amazônia: pesquisas em desenvolvimento regional em Rondônia. Porto Velho: Edufro, 2021. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/228073/1/cpafro-18627.pdf. Acesso em: 3 abr. 2024.

[22] QGIS, Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2025. http://qgis.osgeo.org.

[23] RADAR VERDE. Transparência da Carne na Amazônia: Resultados 2023. Radar Verde, [*s. l.*], 2023. Disponível em: https://radarverde.org.br/wp- content/uploads/2023/11/00_RV-Relatorio-final-2023.pdf. Acesso em: 1 abr. 2024.

[24] SEAGRI. Rondônia é o 2º Estado da região Norte no ranking de produção agropecuária. Secretaria de Estado da Agricultura, [*s. l.*], 5 abr. 2023. Disponível em: https://rondonia.ro.gov.br/rondonia-e-o-2o-estado-da-regiao-norte-no-ranking- de-producao-agropecuaria/. Acesso em: 20 jun. 2024.

[25] SILVA, J. G.; GURGEL, A. C. Impactos Econômicos de Cenários de Políticas Climáticas para o Brasil. **Pesquisa e planejamento econômico**, [*s. l.*], 2012.

[26] SKIDMORE, M.; MOFFETTE, F.; RAUSCH, L.; GIBBS, H. K. Characterizing compliance in cattle supply chains: What factors encourage deforestation-free production in the Brazilian Amazon?. Conservation Letters, [s. l.], 2020. Disponível em: https://743a3c3a-9890-45b8- a645-7c0b50c92edb.filesusr.com/ugd/5e1a0d_d0736c11c9c949c39c802c6f9da0d1a5.pdf. Acesso em: 17 jul. 2024.

[27] SOARES FILHO, B. S.; DIETZSCH, L.; MOUTINHO, P.; FALIERI, A.; RODRIGUES, H.; PINTO, E.; MARETTI, C. C.; SCARAMUZZA, C. A. M.; ANDERSON, A.; SUASSUNA, K.; LANNA, M.; ARAÚJO, F. V. Redução das emissões de carbono do desmatamento no Brasil: o papel do Programa Áreas Protegidas da Amazônia (Arpa). IPAM, [*s. l.*], 2009. Disponível em: https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/n0d00324.pdf. Acesso em: 24 jun. 2024.

[28] *TRASE*. Brazil Beef Suplly Chain. [*S. l.*], 2017. Disponível em: https://trase.earth/explore/supply-chain/brazil/beef?chartType=bar&year=2020&indicator=commodity_deforestation_total_exposure&dimension=exporter_group. Acesso em: 6 fev. 2024.

[29] TERRACLASS. [*S. l.*], 2022. Disponível em: https://www.terraclass.gov.br/download-de-dados#!. Acesso em: 26 mar. 2025.

[30] VALE, R. C.; VALE, P.; GIBBS, H.; PEDRÓN, D.. Regional expansion of the beef industry in Brazil: from the coast to the Amazon, 1966–2017. **Regional Studies, Regional Science**, 9(1): 641-664, 2022. DOI https://doi.org/10.1080/21681376.2022.2130088. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21681376.2022.2130088. Acesso em: 22 ago. 2024.

[31] VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; TARIFA, R.; UHL, C. Extraction of a high-value natural resource in Amazonia: the case of mahogany. **Forest Ecology and Management**, [*s. l.*], p. 39- 60, 1995.

[32] WEST, T. A. P.; RAUSCH, L.; MUNGER, J.; GIBBS, H. Protected areas still used to produce Brazil's cattle. **Conservation Letters**, [*s. l.*], 2022. doi:10.1111/conl.12916.

Capítulo 7

Mini revisão sobre a remoção biológica aprimorada do fósforo: fundamentos, fatores operacionais e perspectivas futuras

Letícia Fabris
Taiane Guedes
Delmira Beatriz Wolff
Elvis Carissimi
Salatiel Wohlmuth Da Silva
Jandira Leichtweis

Resumo: O fósforo é um nutriente importante para os organismos vivos, no entanto sua presença em excesso nos corpos hídricos está associada à eutrofização e degradação da qualidade da água. Desse modo, a Remoção Biológica Aprimorada de Fósforo (EBPR – sigla em inglês) é uma alternativa eficaz e sustentável para o controle desse nutriente em águas residuárias. O processo é baseado na atividade de organismos acumuladores de polifosfato (PAOs), capazes de promover a remoção biológica de fósforo por meio da alternância entre condições anaeróbias e aeróbias. Este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos microbiológicos EBPR, os principais mecanismos envolvidos na remoção biológica de fósforo, os fatores operacionais que influenciam o desempenho do processo e os avanços recentes relacionados a otimização e aplicação dessa tecnologia. Compreender esses aspectos é essencial para o desenvolvimento de sistemas de tratamentos mais eficientes, contribuindo para a proteção dos ecossistemas aquáticos e para o gerenciamento sustentável de fósforo.

Palavras-chave: Fósforo; Remoção Biológica Aprimorada de Fósforo; Tratamento de Efluentes; Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento das concentrações de nutrientes nos corpos hídricos, especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P), são um dos principais problemas ambientais associados ao lançamento de águas residuárias domésticas e industriais sem tratamento adequado. Dentre os nutrientes, o P tem papel principal nos processos de eutrofização, promovendo o crescimento desenfreado de algas e cianobactérias, redução do oxigênio dissolvido (OD) e como consequência, comprometendo a qualidade da água e dos ecossistemas aquáticos (Zhang et al., 2024a). O aumento da urbanização, da produção agrícola e das atividades industriais intensificadas contribuem de maneira expressiva para o aumento da carga de P lançada no ambiente aquático. As legislações ambientais em diversos países têm estabelecido limites restritivos para o P em efluentes tratados, com isso impulsionando o desenvolvimento de tecnologias eficientes para a remoção desse nutriente (Abdoli et al., 2024; Boer, 2016). No Brasil, as Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 estabelecem diretrizes para a proteção dos corpos hídricos e para o lançamento de efluentes, contribuindo para controle do aporte de nutrientes e para a mitigação dos processos de eutrofização (CONAMA, 2005; CONAMA 2011).

A remoção tradicional do P em estações de tratamento de esgoto (ETE) ocorre especialmente por processos físico-químicos, geralmente por precipitação química utilizando sais de alumínio (Al), ferro (Fe) ou cálcio (Ca). Os métodos apresentam eficiência significativa, porém possuem limitações importantes, como o consumo elevado de reagentes químicos, aumento da produção de lodo e custos operacionais superiores. Desse modo, a remoção biológica de fósforo surge como uma alternativa economicamente viável e sustentável (Oleszkiewicz et al., 2015).

O processo de remoção biológica de fósforo (Enhanced Biological Phosphorus Removal – EBPR) ocorre a partir da atuação de microrganismos capazes de acumular polifosfato, denominados (Polyphosphate Accumulating Organisms – PAOs), capazes de absorver P em quantidades maiores que a necessária para seu metabolismo celular. A alternância entre as condições anaeróbias e aeróbias é a maneira como o processo ocorre, sendo que os PAOs desempenham ciclos metabólicos próprios de liberação e posterior absorção exacerbada de P (Ruiz-Haddad et al., 2024).

O EBPR nos últimos tempos se firmou como uma tecnologia eficiente para a remoção de P em sistemas de lodos ativados, e tem sido aplicado em muitas estações de tratamento de águas residuárias (ETARs) em diversos países. O processo apresenta benefícios em relação à diminuição do uso de produtos químicos, menor geração de resíduos e potencial recuperação de P, aspecto de relevância significativa frente à compreensão de escassez global desse recurso natural (Diaz et al., 2022a).

Avanços atuais na microbiologia ambiental e nas técnicas moleculares concederam a ampliação do conhecimento da diversidade microbiana envolvida no EBPR. Em estudos recentes, foi demonstrado que diferentes grupos de PAOs apresentam características metabólicas diferentes, influenciando diretamente na estabilidade e eficiência de operação dos sistemas biológicos. Processos integrados de remoção simultânea de P e N e sistemas *sidestream* EBPR, vem sendo investigados como o objetivo de otimizar o sistema de operação visando uma maior sustentabilidade dos sistemas de tratamento (Li et al., 2024a).

Desse modo, o presente capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos da remoção biológica de P, os principais mecanismos microbiológicos envolvidos, os fatores que influenciam o desempenho dos sistemas EBPR, bem como os avanços atuais e perspetivas futuras dessa tecnologia.

2. IMPORTÂNCIA DO FÓSFORO NOS ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS

O P tem papel essencial na manutenção dos processos biológicos celulares, e estão diretamente associados aos processos metabólicos, como síntese de ácidos nucleicos, formação de membranas celulares e metabolismo energético. Nos ambientes aquáticos naturais, sua disponibilidade ocorre em concentrações menores, e com isso é constantemente o nutriente limitante para organismos fotossintetizantes. Com isso, poucas alterações na sua concentração podem favorecer que ocorra mudanças significantes na produção biológica dos ecossistemas aquáticos (Correll, 1998; Schindler, 1977).

O modo da sociedade atual é a principal fonte responsável pela crescente detecção de P nos corpos hídricos, destacando-se o lançamento de esgotos domésticos, efluentes industriais, escoamento superficial urbano e atividades agropecuárias. O P encontrado nos esgotos sanitários, estão associados a excreção humana, resíduos provenientes de alimentos e detergentes que contenham compostos fosfatados. A expansão das atividades de produção aliado ao crescimento populacional contribuem para o aumento das cargas de P lançadas no meio ambiente, o que intensifica os impactos negativos sobre os corpos d´água (Hansen and Feiden, 2025; Quevedo and Paganini, 2018).

O crescimento da concentração nos ambientes aquáticos, de modo especial o P e N, favorecem a ocorrência da eutrofização. O processo é caracterizado pelo crescimento rápido de cianobactérias e algas, o que resulta em alterações importantes no funcionamento dos ecossistemas aquáticos. Entre os principais impactos da eutrofização destacam-se a redução da transparência da água, diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido (OD), mortalidade dos organismos aquáticos e a decadência da qualidade da água. Nos sistemas de água doce o P é reconhecido com frequência como o nutriente principal responsável por intensificar a eutrofização (Dodds and Smith, 2016; Marcos von Sperling, 2022; Smith et al., 1999).

Além da necessidade de controle da poluição hídrica, a remoção de P passou a ser considerada importante e necessária para a conservação dos recursos naturais, de modo especial devido à crescente preocupação com a sustentabilidade global desse elemento. O desenvolvimento de tecnologias voltadas à remoção eficiente desse nutriente, incluindo processos físico-químicos e biológicos, foram impulsionados por esse cenário. A preocupação com a disponibilidade de P no futuro tem aumentado o interesse em estratégias de reutilização e recuperação desse recurso, levando em consideração que as rochas fosfáticas mundiais são finitas e de grande relevância para produção agrícola global (Cordell et al., 2009).

3. MÉTODOS DE REMOÇÃO DE FÓSFORO EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Entre as tecnologias tradicionalmente empregadas para remover P em ETARs, têm-se os processos físico-químicos, pela precipitação química utilizando sais de Fe, Cal e Al. Os íons metálicos, reagem com os fosfatos dissolvidos e formam compostos insolúveis, sendo posteriormente removidos por sedimentação ou flotação. Devido a eficiência elevada na remoção do P, esses métodos foram adotados em sistemas de tratamento que necessitam atender padrões rigorosos de lançamento de efluentes (de-Bashan and Bashan, 2004).

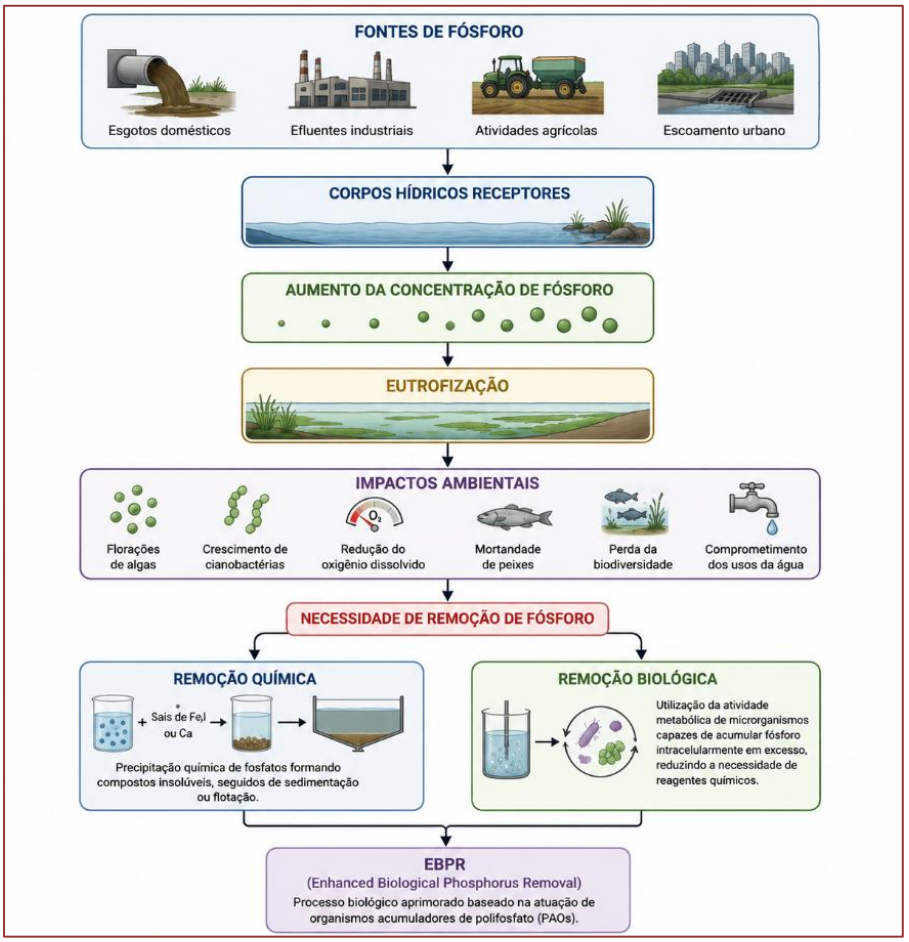
Embora apresentem bom desempenho, os sistemas físico-químicos têm limitações operacionais e econômicas. O alto consumo de reagentes químicos eleva os custos de operação, enquanto o aumento da produção de lodo químico encarece seu manejo e sua destinação final. Além disso, o P incorporado ao lodo dificulta sua recuperação para reutilização, reduzindo o potencial de aproveitamento desse recurso (Desmidt et al., 2015).

O avanço do conhecimento microbiológico ajudou no desenvolvimento de processos baseados no metabolismo das comunidades microbianas para a remoção de P biologicamente. Os sistemas exploram a capacidade dos grupos microbianos acumularem P intracelularmente em concentrações maiores que o necessário para o seu crescimento celular, diminuindo assim a necessidade de serem adicionados reagentes químicos, conseguindo dessa maneira promover sustentabilidade operacional (Oehmen et al., 2007).

A escolha entre processos físico-químicos e biológicos é influenciada por fatores técnicos, econômicos e ambientais. A precipitação química tem elevada capacidade operacional e reposta satisfatória às variações de carga, nos sistemas biológicos tem-se as vantagens em relação a diminuição do consumo de produtos químicos, baixa geração de lodo e potencial elevado para que seja recuperado o P. Já os processos biológicos exigem um maior controle de operação e condições adequada para o monitoramento da atividade microbiana (Zheng et al., 2023).

Desse modo, a Remoção Biológica Aprimorada de Fósforo (Enhanced Biological Phosporus Removal – EBPR) se destaca como uma tecnologia eficiente e bastante estudada. O processo é baseado na seleção de organismos acumuladores de polisfosfato (PAOs), que tem a capacidade de armazenar P intracelularmente por meio da alternância entre condições anaeróbias e aeróbias. O processo EBPR tem recebido maior atenção nos últimos tempos, pelo seu potencial de remover de maneira eficiente P associado à diminuição do consumo de reagentes químicos e sua possibilidade de recuperar esse nutriente (Diaz et al., 2022). Na Figura 1, é possível observar um esquema das principais fontes de P nos ecossistemas aquáticos e as alternativas que podem ser empregadas durante o tratamento de efluentes.

Figura 1 - Representação esquemática das principais fontes de P, seus impactos no ambiente e alternativas de tratamento.



Fonte: Adaptado de (Oehmen et al., 2007).

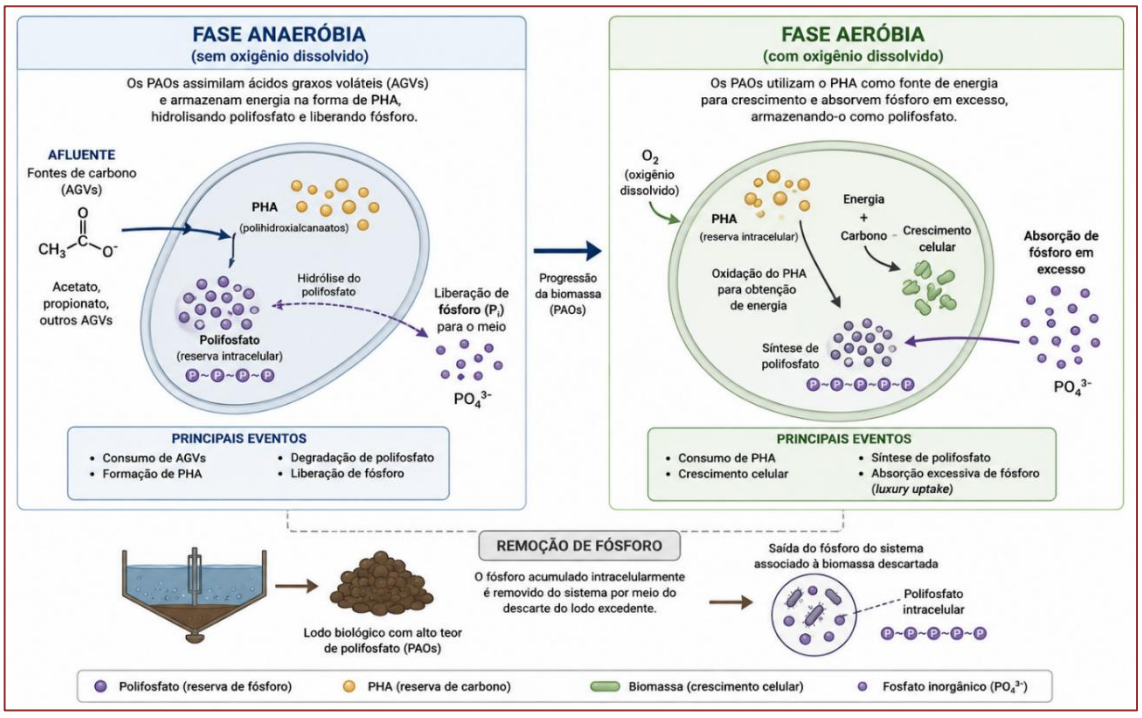
4. FUNDAMENTOS MICROBIOLÓGICOS DA EBPR

O funcionamento dos sistemas EBPR é associado diretamente a atividade microbiana que são especializadas em acumular P. Os PAOS são fundamentais na remoção biológica de P por meio de mecanismos de alternância entre as condições aeróbicas e anaeróbias. Compreender esse mecanismo é imprescindível para entender e otimizar os sistemas EBPR (Muszyński et al., 2023). Dentre os microrganismos envolvidos no EBPR, os PAOs assumem papel fundamental por terem a capacidade de acumular P dentro das células na forma de polifosfato. Entre as espécies associadas aos sistemas destacam-se *Candidatus Accumulibacter phosphatis*, sendo considerado o principal organismo modelo para estudos relacionados à remoção biológica de P (Petriglieri et al., 2022).

Em condições anaeróbias, os PAOs absorvem os ácidos graxos voláteis, em especial o acetato e propionato, que são encontrados no efluente. A energia que se faz necessária para essa absorção é alcançada por meio da hidrólise das reservas intracelulares de polifosfato, ocasionando na liberação de ortofosfato para o meio líquido. Ao mesmo tempo os compostos orgânicos assimilados são armazenados dentro das células na forma de polihidroxialcanoatos (PHAs), que no processo serão fonte de energia na etapa aeróbia consecutiva. (Hesselmann, 2000; Izadi et al., 2021a). O poli-β-hidroxibutirato (PHB) é um dos principais tipos de PHA acumulados pelos PAOs durante a fase anaeróbia (Acevedo et

al., 2012). Na fase aeróbia, os PAOs utilizam os PHAs armazenados anteriormente como fonte de energia para o crescimento celular. A absorção do P nesse processo ocorre em quantidades elevadas em comparação com a etapa anaeróbia, fenômeno denominado "absorção de luxo" (*luxury phosphorus uptake*). E como consequência o P é incorporado à biomassa microbiana e após retirado do sistema pelo descarte do lodo restante (He and McMahon, 2011; Levin and Shapiro, 1965; Mino et al., 1998). Na Figura 2 é possível observar um esquema ilustrativo do mecanismo metabólico dos PAOs durante as fases anaeróbia e aeróbia no processo de EBPR.

Figura 2 - Mecanismo dos PAOs no processo de EBPR.



Fonte: Adaptado de (Diaz et al., 2022).

5. FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DO SISTEMA EBPR

Para que haja a remoção biológica de P não é necessária somente a presença dos PAOs, as condições operacionais precisam ser favoráveis para que se tenha uma atividade metabólica satisfatória. Diversos parâmetros operacionais e ambientais tendem influenciar a estabilidade do processo, representando de maneira direta a eficiência da remoção do P e formação das comunidades microbianas presentes no sistema. Dentre os fatores destacam-se a disponibilidade de carbono (C), temperatura, pH, oxigênio dissolvido e a relação dos nutrientes presentes no afluente (Liese et al., 2026).

Os ácidos graxos voláteis (AGVs), em especial o acetato e propionato são as principais fontes de C utilizados pelos PAOs na fase anaeróbia do processo EBPR, assimilados e armazenados na forma de PHAs, que fornecerão energia para que seja absorvido o P na etapa aeróbia. A disponibilidade adequada de AGVs é um fator importante para que se obtenha sucesso na remoção biológica de P. Alguns estudos indicam que a quantidade entre o acetato e propionato influenciam a competição entre PAOs e organismos

acumuladores de glicogênio (GAOs), comprometendo a estabilidade do processo (Mino et al., 1998; Oehmen et al., 2006).

A temperatura tem influência significativa sobre o metabolismo dos microrganismos responsáveis pela remoção biológica de P. Alterações de temperatura podem afetar o crescimento das populações microbianas, a utilização dos substratos disponíveis e a dinâmica competitiva entre os PAOs e GAOs. Estudos na literatura relatam, que temperaturas mais elevadas favorecem o crescimento dos GAOs, levando o comprometimento na remoção de P. Em contrapartida temperaturas mais baixas geralmente beneficiam os PAOs, assim tem-se um funcionamento estável do processo. A temperatura é um dos principais parâmetros operacionais de relevância para o desempenho dos sistemas EBPR (Panswad et al., 2003; Whang and Park, 2002).

O pH está ligado diretamente as reações bioquímicas associadas ao metabolismo dos PAOs, valores próximos à neutralidade ou levemente alcalinos favorecem o desenvolvimento dos PAOs, contribuem para maiores eficiência de remoção de P. Ademais, o pH pode influenciar a competição entre os PAOs e GAOs, interferindo na estabilidade do sistema. O monitoramento desse parâmetro é fundamental e necessário para que se tenha condições adequadas ao funcionamento do processo (Jeon et al., 2001; Oehmen et al., 2005).

O OD tem seu papel na fase aeróbia do EBPR, nessa fase ocorre a oxidação dos PHAs e absorção excessiva de P pelos PAOs. Concentrações escassas limitam a atividade microbiana e levam a redução de eficiência do processo, já em condições adequadas favorecem a recuperação das reservas intracelulares de polisfofato e a remoção de P do sistema (Izadi et al., 2021b; Schön et al., 1993) .

Além dos fatores relatados, se faz necessário compreender a relação entre os nutrientes presentes no afluente, pois eles influenciam o desempenho dos sistemas EBPR. A quantidade correta de C em relação ao P é necessária para o metabolismo dos PAOs, a assimilação dos substratos orgânicos durante a fase anaeróbia está ligada aos mecanismos de armazenamento de energia e posterior absorção de P (Diaz et al., 2022). A insuficiência de C e P podem limitar a formação de PHAs na fase anaeróbia, ocorrendo a redução da capacidade dos PAOs absorverem o P na etapa aeróbia levando o comprometimento e a estabilidade do sistema (Mino et al., 1998; Oehmen et al., 2007).

6. ESTUDOS RECENTES E AVANÇOS NO EBPR

Muitos estudos têm contribuído de maneira significativa para o avanço do conhecimento relacionado aos sistemas EBPR, abordando aspectos microbiológicos além de estratégias para aumentar a eficiência do processo e a recupera de P. Na Tabela 1 é possível observar alguns exemplos de pesquisas e suas principais contribuições para o desenvolvimento da área.

Tabela 1 – Estudos relacionados aos sistemas EBPR.

Objetivo do estudo	Resultados obtidos	Referência
Avaliar o desempenho de sistemas Side-Stream EBPR (S2EBPR)	O S2EBPR apresentou maior estabilidade operacional, favoreceu a seleção de PAOs e reduziu a abundância de GAOs quando comparado aos sistemas convencionais.	(Wang et al., 2019)
Recuperação de P associada ao EBPR	A integração entre EBPR e cristalização permitiu remoções médias de 87,5% de fósforo e recuperação de aproximadamente 59% do nutriente na forma de hidroxiapatita.	(Zou and Wang, 2016)
Aplicação em escala real e relação COD:N:P	O estudo demonstrou que a diversidade metabólica dos PAOs e as relações entre C, N e P influenciam diretamente a estabilidade do processo, destacando os desafios da transposição de sistemas laboratoriais para escala real.	(Göttert et al., 2026)
Comparar a microdiversidade de PAOs em sistemas side-stream e EBPR convencional	O estudo demonstrou diferenças significativas na diversidade microbiana dos PAOs entre os sistemas avaliados, indicando impactos diretos no desempenho e estabilidade da remoção biológica de P.	(Li et al., 2024)
Revisar os mecanismos de remoção de P por PAOs	O estudo destacou a importância dos PAOs na remoção biológica de P em sistemas naturais e engenheirados, enfatizando os mecanismos metabólicos e os fatores que influenciam a eficiência do processo EBPR.	(Zhang et al., 2024)

Os trabalhos evidenciam que o desempenho dos sistemas EBPR estão associadas as condições operacionais e as características do afluente. Pode-se inferir que há uma tendência crescente de desenvolvimento de configurações com o intuito de aumentar a estabilidade do processo e favorecer a recuperação do P, fortalecendo o potencial dessa tecnologia para aplicações sustentáveis em sistemas de tratamento de efluentes.

7. CONCLUSÕES

A EBPR se destaca com uma alternativa viável para o controle do P em águas residuárias, contribuindo para a atenuação da eutrofização e para a proteção dos ecossistemas aquáticos. O processo é baseado na atividade metabólica de PAOs, que são capazes de promover a remoção eficaz desse nutriente por meio da alternância das condições anaeróbias e aeróbias. O desempenho dos sistemas é relacionado às condições operacionais e ambientais do processo. A disponibilidade de C, temperatura, pH, OD e composição do afluente influenciam a atividade microbiana e estabilidade das comunidades responsáveis pela remoção biológica de P. O monitoramento e controle constante desses parâmetros são fundamentais para a eficiência satisfatória do sistema. Além de sua importância no tratamento de efluentes, o EBPR tem potencial de crescimento no que diz respeito a recuperação de recursos e economia circular. Compreender as comunidades microbianas e desenvolver estratégias operacionais mais eficazes tem aumentado as perspectivas de utilização dessa tecnologia, tornando-a uma ferramenta promissora para o gerenciamento sustentável do P e a proteção ambiental.

REFERÊNCIAS

[1] Abdoli, S., Asgari Lajayer, B., Dehghanian, Z., Bagheri, N., Vafaei, A.H., Chamani, M., Rani, S., Lin, Z., Shu, W., Price, G.W., 2024. A Review of the Efficiency of Phosphorus Removal and Recovery from Wastewater by Physicochemical and Biological Processes: Challenges and Opportunities. Water 16, 2507. https://doi.org/10.3390/w16172507

[2] Acevedo, B., Oehmen, A., Carvalho, G., Seco, A., Borrás, L., Barat, R., 2012. Metabolic shift of polyphosphate-accumulating organisms with different levels of polyphosphate storage. Water Research 46, 1889–1900. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.003

[3] Boer, B., 2016. The Mekong: a socio-legal approach to river basin development, Earthscan studies in water resource management. Routledge, New York. https://doi.org/10.4324/9781315765556

[4] Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2011. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes e complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, DF.

[5] Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2005. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 (Resolução). Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, DF.

[6] Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change, Traditional Peoples and Climate Change 19, 292–305. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009

[7] Correll, D.L., 1998. The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review. J of Env Quality 27, 261–266. https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x

[8] de-Bashan, L.E., Bashan, Y., 2004. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). Water Research 38, 4222–4246. https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.014

[9] Desmidt, E., Ghyselbrecht, K., Zhang, Y., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., Verstraete, W., Rabaey, K., Meesschaert, B., 2015. Global Phosphorus Scarcity and Full-Scale P-Recovery Techniques: A Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 45, 336–384. https://doi.org/10.1080/10643389.2013.866531

[10] Diaz, R., Mackey, B., Chadalavada, S., kainthola, J., Heck, P., Goel, R., 2022a. Enhanced Bio-P removal: Past, present, and future – A comprehensive review. Chemosphere 309, 136518. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136518

[11] Diaz, R., Mackey, B., Chadalavada, S., kainthola, J., Heck, P., Goel, R., 2022b. Enhanced Bio-P removal: Past, present, and future – A comprehensive review. Chemosphere 309, 136518. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136518

[12] Dodds, W.K., Smith, V.H., 2016. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams. Inland Waters 6, 155–164. https://doi.org/10.5268/IW-6.2.909

[13] Göttert, D., Van Winckel, T., Geesey, J., Li, Z., Dries, J., 2026. Full-scale enhanced biological phosphorus removal implementation: Process performance and microbial community dynamics treating potato processing wastewater. Water Resources and Industry 35, 100362. https://doi.org/10.1016/j.wri.2026.100362

[14] Hansen, J.P.M., Feiden, A., 2025. A DINÂMICA DO APORTE DE FÓSFORO NA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS. ARE 7, 36576–36592. https://doi.org/10.56238/arev7n7-081

[15] He, S., McMahon, K.D., 2011. Microbiology of 'Candidatus Accumulibacter' in activated sludge. Microb Biotechnol 4, 603–619. https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2011.00248.x

[16] Hesselmann, R., 2000. Anaerobic metabolism of bacteria performing enhanced biological phosphate removal. Water Research 34, 3487–3494. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00092-0

[17] Izadi, Parnian, Izadi, Parin, Eldyasti, A., 2021a. A review of biochemical diversity and metabolic modeling of EBPR process under specific environmental conditions and carbon source availability. Journal of Environmental Management 288, 112362. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112362

[18] Izadi, Parnian, Izadi, Parin, Eldyasti, A., 2021b. Understanding microbial shift of Enhanced Biological Phosphorus Removal process (EBPR) under different Dissolved Oxygen (DO) concentrations

and Hydraulic Retention Time (HRTs). Biochemical Engineering Journal 166, 107833. https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107833

[19] Jeon, C.O., Lee, D.S., Lee, M.W., Park, J.M., 2001. Enhanced Biological Phosphorus Removal in an Anaerobic–Aerobic Sequencing Batch Reactor: Effect of pH. Water Environment Research 73, 301–306. https://doi.org/10.2175/106143001X139407

[20] Levin, G.V., Shapiro, J., 1965. Metabolic uptake of phosphorus by wastewater organisms. J. Wat. Pollut. Control Fed. 37, 800–821.

[21] Li, G., Srinivasan, V., Tooker, N.B., Wang, D., Yan, Y., Onnis-Hayden, A., Gu, A.Z., 2024a. Distinct microdiversity of phosphate accumulating organisms (PAOs) between side-stream and conventional enhanced biological phosphorus removal (EBPR) systems with performance implications. Water Res 266, 122280. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122280

[22] Li, G., Srinivasan, V., Tooker, N.B., Wang, D., Yan, Y., Onnis-Hayden, A., Gu, A.Z., 2024b. Distinct microdiversity of phosphate accumulating organisms (PAOs) between side-stream and conventional enhanced biological phosphorus removal (EBPR) systems with performance implications. Water Research 266, 122280. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122280

[23] Liese, V., Akgün, B., Elreedy, A., Lapp, J., Ferle, K., Moll, R., Gescher, J., Morck, T., 2026. EBPR process dynamics under variable conditions: interaction between PAOs and the microbial community. Bioresource Technology 440, 133468. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133468

[24] Marcos von Sperling, 2022. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, 4th ed. Editora UFMG, Belo Horizonte.

[25] Mino, T., Van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., 1998. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process. Water Research 32, 3193–3207. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00129-8

[26] Muszyński, A., Monika, Załęska-Radziwiłł, 2023. Influence of the bioreactor operating mode and wastewater composition on the structure of microbial communities in activated sludge and abundance and activity of polyphosphate and glycogen accumulating organisms. Desalination and Water Treatment 301, 91–105. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29452

[27] Oehmen, A., Lemos, P., Carvalho, G., Yuan, Z., Keller, J., Blackall, L., Reis, M., 2007. Advances in enhanced biological phosphorus removal: From micro to macro scale. Water Research 41, 2271–2300. https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.02.030

[28] Oehmen, A., Saunders, A.M., Vives, M.T., Yuan, Z., Keller, J., 2006. Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources. Journal of Biotechnology 123, 22–32. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2005.10.009

[29] Oehmen, A., Teresa Vives, M., Lu, H., Yuan, Z., Keller, J., 2005. The effect of pH on the competition between polyphosphate-accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms. Water Research 39, 3727–3737. https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.06.031

[30] Oleszkiewicz, J., Kruk, D., Devlin, T., Yuan, Q., Lashkarizadeh, M., 2015. Options for Improved Nutrient Removal and Recovery from Municipal Wastewater in the Canadian Context.

[31] Panswad, T., Doungchai, A., Anotai, J., 2003. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system. Water Research 37, 409–415. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00286-5

[32] Petriglieri, F., Singleton, C.M., Kondrotaite, Z., Dueholm, M.K.D., McDaniel, E.A., McMahon, K.D., Nielsen, P.H., 2022. Reevaluation of the Phylogenetic Diversity and Global Distribution of the Genus " *Candidatus* Accumulibacter." mSystems 7, e00016-22. https://doi.org/10.1128/msystems.00016-22

[33] Quevedo, C.M.G., Paganini, W.S., 2018. [Phosphorus delivered to surface waters resulting from the use of powder detergents: environmental and public health aspects]. Cien Saude Colet 23, 3891–3902. https://doi.org/10.1590/1413-812320182311.27062016

[34] Ruiz-Haddad, L., Ali, M., Pronk, M., Van Loosdrecht, M.C.M., Saikaly, P.E., 2024. Demystifying polyphosphate-accumulating organisms relevant to wastewater treatment: A review of their phylogeny, metabolism, and detection. Environmental Science and Ecotechnology 21, 100387.

https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100387

[35] Schindler, D.W., 1977. Evolution of Phosphorus Limitation in Lakes: Natural mechanisms compensate for deficiencies of nitrogen and carbon in eutrophied lakes. Science 195, 260–262. https://doi.org/10.1126/science.195.4275.260

[36] Schön, G., Geywitz, S., Mertens, F., 1993. Influence of dissolved oxygen and oxidation-reduction potential on phosphate release and uptake by activated sludge from sewage plants with enhanced biological phosphorus removal. Water Research 27, 349–354. https://doi.org/10.1016/0043-1354(93)90033-E

[37] Smith, V.H., Tilman, G.D., Nekola, J.C., 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. Environmental Pollution 100, 179–196. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3

[38] Wang, D., Tooker, N.B., Srinivasan, V., Li, G., Fernandez, L.A., Schauer, P., Menniti, A., Maher, C., Bott, C.B., Dombrowski, P., Barnard, J.L., Onnis-Hayden, A., Gu, A.Z., 2019. Side-stream enhanced biological phosphorus removal (S2EBPR) process improves system performance - A full-scale comparative study. Water Research 167, 115109. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115109

[39] Whang, L.M., Park, J.K., 2002. Competition between polyphosphate- and glycogen-accumulating organisms in biological phosphorus removal systems--effect of temperature. Water Sci Technol 46, 191–194.

[40] Zhang, Y., Qiu, X., Luo, J., Li, H., How, S.-W., Wu, D., He, J., Cheng, Z., Gao, Y., Lu, H., 2024a. A review of the phosphorus removal of polyphosphate-accumulating organisms in natural and engineered systems. Science of The Total Environment 912, 169103. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169103

[41] Zhang, Y., Qiu, X., Luo, J., Li, H., How, S.-W., Wu, D., He, J., Cheng, Z., Gao, Y., Lu, H., 2024b. A review of the phosphorus removal of polyphosphate-accumulating organisms in natural and engineered systems. Science of The Total Environment 912, 169103. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169103

[42] Zheng, Y., Wan, Y., Zhang, Y., Huang, J., Yang, Y., Tsang, D.C.W., Wang, H., Chen, H., Gao, B., 2023. Recovery of phosphorus from wastewater: A review based on current phosphorous removal technologies. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 53, 1148–1172. https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2128194

[43] Zou, H., Wang, Y., 2016. Phosphorus removal and recovery from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization. Bioresource Technology 211, 87–92. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.073

Capítulo 8

Valorização de resíduos de casca de abacaxi como bioadsorvente para remoção de azul de metileno: estudos cinéticos e isotérmicos

Heloyse Reges Chaves
João Victor Silva Sousa
Ana Vitória Santos Marques
Meiry Gláucia Freire Rodrigues
Tellys Lins Almeida Barbosa

Resumo: O setor têxtil representa um dos maiores consumidores mundiais de água, recurso indispensável à vida e à atividade industrial. Entretanto, a gestão ambiental dos resíduos gerados por esse tipo de indústria ainda é um desafio, visto que há uma considerável geração de efluentes altamente coloridos e tóxicos, especialmente devido à composição de corantes sintéticos que, mesmo em baixas concentrações, afetam a normalidade dos corpos hídricos e, por consequência, os ecossistemas aquáticos. Dado este cenário, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a utilização da casca do abacaxi, um resíduo agroindustrial abundante, em especial no Brasil, como bioadsorvente para o tratamento de efluentes têxteis na remoção do corante sintético azul de metileno. Os ensaios de adsorção foram realizados após secagem e moagem da biomassa, a fim de verificar a influência do pH, realizar os estudos cinéticos e de isotermas. Além disso, realizou-se caracterização por espectroscopia na região do infravermelho (FTIR), com o intuito de identificar os principais grupos funcionais potencialmente envolvidos no processo de adsorção. O bioadsorvente apresentou eficiência de remoção de 93,7% para o azul de metileno, em pH 4, além de terem sido registrados ótimos ajustes dos dados experimentais ao modelo teórico de pseudo-segunda ordem para a cinética e ao modelo das isotermas de Sips, aplicado na regressão.

Palavras-chaves: Adsorção; Corantes têxteis; Biomassa; Tratamento de efluentes; Resíduos agroindustriais.

1. INTRODUÇÃO

A crescente intensificação das atividades industriais tem contribuído significativamente para o aumento da contaminação de corpos hídricos por diferentes tipos de poluentes. Entre esses contaminantes destacam-se os corantes sintéticos utilizados em setores como as indústrias têxtil, farmacêutica, de papel e de alimentos. Muitos desses compostos apresentam elevada estabilidade química, resistência à biodegradação e forte coloração, o que dificulta sua remoção por processos convencionais de tratamento de efluentes e pode comprometer a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos (KANT, 2012).

Dentre os diversos corantes utilizados industrialmente, o azul de metileno é frequentemente empregado como composto modelo em estudos de tratamento de efluentes devido à sua estabilidade e facilidade de detecção em meio aquoso. A presença desse corante em ambientes aquáticos pode reduzir a penetração de luz nos corpos d'água, afetando processos fotossintéticos e alterando o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. Além disso, sua presença em efluentes industriais tem motivado o desenvolvimento de diferentes tecnologias voltadas à sua remoção eficiente antes do descarte no meio ambiente (RAFATULLAH *et al*., 2010; AL-ASADI et al., 2025)

Diversas técnicas têm sido investigadas para o tratamento de efluentes contendo corantes, incluindo processos de oxidação avançada, coagulação-floculação, filtração por membranas e biodegradação. Entretanto, muitos desses métodos apresentam limitações relacionadas ao elevado custo operacional, geração de subprodutos ou baixa eficiência para determinados compostos. Nesse contexto, a adsorção destaca-se como uma das tecnologias mais promissoras para remoção de corantes em soluções aquosas, devido à sua simplicidade operacional, elevada eficiência e possibilidade de utilização de materiais adsorventes de baixo custo. Estudos recentes demonstram que diferentes materiais adsorventes podem apresentar elevadas capacidades de remoção de corantes, dependendo de fatores como pH, tempo de contato, concentração inicial do contaminante e características da superfície do adsorvente (JAWAD *et al*., 2023).

Nos últimos anos, tem crescido o interesse na utilização de resíduos agroindustriais como materiais adsorventes alternativos. Esses materiais apresentam vantagens importantes, como ampla disponibilidade, baixo custo e caráter renovável, além de contribuírem para a valorização de resíduos e redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado de biomassa. Diversos estudos relatam o potencial de materiais lignocelulósicos provenientes de resíduos agrícolas (como cascas de frutas, fibras vegetais e resíduos florestais) na remoção de corantes de soluções aquosas (SILVA *et al*., 2019).

Entre os resíduos agroindustriais com potencial aplicação em processos de adsorção destaca-se a casca do abacaxi, um subproduto gerado em grande quantidade pela indústria alimentícia e pelo consumo doméstico da fruta. Esse material apresenta composição rica em celulose, hemicelulose e lignina, além de possuir diferentes grupos funcionais capazes de interagir com moléculas de corantes presentes em solução. Pesquisas recentes indicam que materiais derivados desse resíduo podem apresentar elevada eficiência na remoção de azul de metileno, atingindo altas taxas de remoção em condições experimentais adequadas (HABIBU *et al*., 2023).

Diante desse contexto, a investigação do potencial de resíduos agroindustriais como adsorventes para remoção de corantes em meio aquoso apresenta grande relevância ambiental e tecnológica. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o

potencial da casca do abacaxi como material adsorvente para a remoção de azul de metileno em solução aquosa, por meio de estudos experimentais em sistemas de adsorção em batelada, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais (LABNOV), da Unidade Acadêmica de Engenharia Química, localizado no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEQ/CCT/UFCG).

2.1. MATERIAIS

Os reagentes, produtos e equipamentos utilizados neste trabalho estão apresentados no Quadro 1.

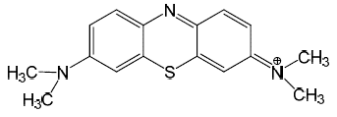
Quadro 1. Reagentes, produtos e equipamentos utilizados neste trabalho.

Equipamentos	Reagentes	Materiais e acessórios
Balança analítica - Marte®, AL500 C	Casca do abacaxi (triturada e seca a 80ºC)	Água destilada
Espectrofotômetro – Shimadzu®, UV – 1600 Pró-Análise	Corante azul de metileno – Synth	Papel de filtro
Estufa – Quimis®	HCl Neon© (Ácido Clorídrico) – Solução 1 $mol.L^{-1}$	Vidrarias
Mesa Agitadora – CERTOMAT®	NaOH Neon© (Hidróxido de sódio) – Solução 1 $mol.L^{-1}$	-
pHmêtro – Agilent Technologies®	-	-

Fonte: Autora (2026).

O corante utilizado foi o azul de metileno. Na Tabela 1 constam as características gerais do corante utilizado.

Tabela 1. Características do corante azul de metileno.

Característica	Propriedades
Estutura Molecular	
Nome	Azul de metileno
No. CAS	61-73-4
Absorbância - $\lambda_{máx}$	664 nm
Massa Molecular	319,85 g/mol
Fórmula Molecular	$C_{16}H_{18}N_3SCl$
Classe Química	Catiônico

Fonte: Autora (2026).

2.2. MÉTODOS

2.2.1. PREPARAÇÃO DO BIOADSORVENTE

A matéria-prima utilizada como bioadsorvente foi a casca do abacaxi retirada da fruta, adquirida em supermercados diversos da cidade de Campina Grande. O material foi preparado através da secagem em estufa, a 80 °C por 24 h. Após esse período a casca do abacaxi foi triturada grosseiramente em liquidificador e posteriormente submetida a um moinho de facas, para redução da granulometria.

Figura 1. À esquerda, fruta *in natura*, à direita, amostra da casca do abacaxi após secagem e trituração.

Fonte: Autora (2026).

2.2.2. CARACTERIZAÇÕES

2.2.2.1. ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO (IV)

A identificação dos grupos funcionais presentes na casca do abacaxi foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Os espectros foram obtidos utilizando o equipamento VERTEX 70 (Bruker©), operando na faixa de comprimento de onda, com varredura de 4000 a 400 cm^{-1}. Destaca-se que esta análise foi feita para o material antes e após a adsorção.

Figura 2. Casca do abacaxi pós-adsorção do corante azul de metileno.

Fonte: Autora (2026).

2.2.2.2. DIFRAÇÃO DE RAIO-X (DRX)

A difração de raios X foi realizada utilizando um difratômetro Rigaku Miniflex 600, empregando radiação CuKα (λ = 0,15418 nm). A análise foi conduzida com velocidade do goniômetro de 10,0° min^{-1}**,** tensão de 40 kV, corrente de 15 mA, passo angular de 0,02° e faixa de varredura (2θ) de 5,0° a 40,0°.

2.2.3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Para os estudos de adsorção, inicialmente preparou-se uma solução mãe, com concentração de 1000 $mg.L^{-1}$, do corante azul de metileno. A partir da solução mãe, realizou- se a diluição para uma concentração de 50 $mg.L^{-1}$, através da equação geral de diluição:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \qquad (01)$$

Daí obteve-se a solução desejada para continuidade dos ensaios em banho finito, conforme ilustrada na Figura 3.

Figura 3. Solução mãe de azul de metileno, à esquerda e, à direita, diluída a 50 mg.L^{-1}.

Fonte: Autora (2026).

2.2.3.1. INFLUÊNCIA DO PH

Para avaliação da influência do pH, foi utilizada uma solução de corante azul de metileno com concentração de 50 mg.L^{-1}. Em um erlenmeyer de 125 mL pesou-se 0,5g da casca do abacaxi. Após essa etapa, realizou-se o ajuste de pH na solução do corante, utilizando soluções de HCl e NaOH (ambas a 1 mol.L^{-1}), realizando medições diretas com o pHmêtro submerso na solução, percorrendo uma faixa entre 1 e 12. O sistema (solução de corante azul de metileno + casca do abacaxi) foi conduzido à mesa agitadora a 200 rpm por um período de 1h. Decorrido o tempo de contato, cada amostra foi filtrada e em seguida, analisou-se as concentrações restantes do corante com o auxílio do espectrofotômetro UV- VIS.

Na literatura (Von Sperling, 2014), verifica-se que a porcentagem de remoção e a capacidade de remoção de determinado poluente no tratamento de águas residuais podem ser obtidas pelas Equações 02 e 03:

$$\%Rem = \frac{(C_0 - C_f)}{C_f} \cdot 100 \qquad (02)$$

$$q = \frac{V}{m}(C_0 - C_f) \qquad (03)$$

Onde: C_0 – concentração inicial da solução corante (mg.L^{-1}); C_f – concentração final restante após a adsorção (mg.L^{-1}); V – volume de solução corante (L); m – massa de adsorvente (g).

2.2.3.2. CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Para execução do estudo cinético foram preparados ensaios com 0,5g da casca do abacaxi e 50 mL de solução do corante, ajustada ao pH de melhor performance na etapa anterior. Cada sistema permaneceu em agitação em intervalos de tempos diferentes, totalizando 12 amostras. Após os tempos decorridos, o material foi filtrado e as concentrações finais determinadas a partir do espectrofotômetro UV-VIS. Os modelos

cinéticos de pseudo- primeira ordem e pseudo-segunda ordem, segundo Nascimento (2020), estão descritos, respectivamente, nas Equações 04 e 05:

$$\frac{dq_{(t)}}{dt} = k_1 \cdot (q_e - q_{(t)}) \qquad (04)$$

$$\frac{dq_{(t)}}{dt} = k_2 \cdot (q_e - q_{(t)})^2 \qquad (05)$$

Em que: $k1$ – Constante da taxa de adsorção do modelo de pseudo-primeira ordem (min-1); $k2$ – Constante da taxa de adsorção do modelo de pseudo-segunda ordem (g.mg-1.min-1); qe – Quantidade adsorvida no equilíbrio (mg.g-1); $q(t)$ – Quantidade adsorvida no instante t (mg.g-1).

Os dados obtidos após os experimentos foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem com o auxílio do software Origin 2021©.

2.2.3.3. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

Na determinação das isotermas de adsorção, a partir da solução mãe (1000 $mg.L^{-1}$) foram preparadas 11 soluções com diferentes concentrações do corante azul de metileno entre 20 e 250 $mg.L^{-1}$. O pH de todas as soluções novamente foi ajustado ao de melhor performance nos estudos anteriores e a temperatura em todos os ensaios foi ambiente, em torno de 25 ºC. Para os ensaios, as soluções ficaram em contato com a casca do abacaxi por um período de 60 min, em mesa agitadora com agitação de 200 rpm. Após o tempo estabelecido, as amostras foram filtradas e suas concentrações foram determinadas por espectroscopia UV-VIS.

Na Tabela 2 estão apresentadas as equações dos modelos matemáticos (Nascimento, 2020; Danat *et al.*, 2026) utilizados neste trabalho em suas formas não lineares.

Tabela 2. Modelos matemáticos das isotermas de adsorção.

Isoterma	Modelo
Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$
Freundlich	$q_e = K_f (C_e)^{\frac{1}{n}}$
Sips	$q_e = \frac{q_0 K_S C_e^{1/n}}{1 + K_S C_e^{\beta \frac{1}{n}}}$
Redlich-Peterson	$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{1 + a_{RP} C_e^{\beta}}$

Fonte: Autora (2026).

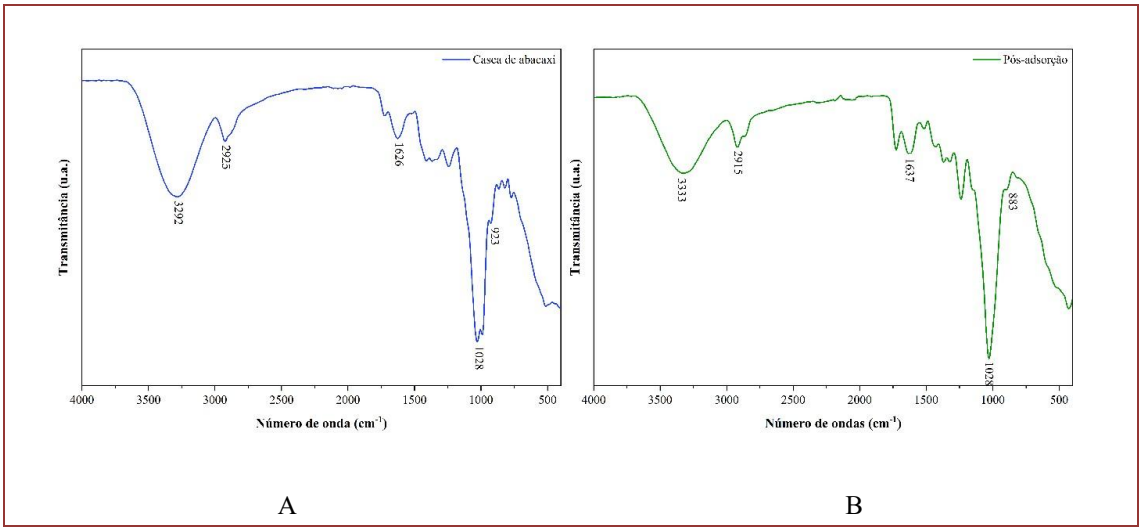
Os dados obtidos após os experimentos foram ajustados aos modelos das isotermas de Langmuir, Freundlich, Sips, Temkin e Redlich-Peterson com o auxílio do software Origin 2021©.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO (FTIR)

As análises de Infravermelho (FTIR) da casca do abacaxi antes e pós adsorção, estão apresentadas na Figura 4.

Figura 4. Espectros de IV da casca do abacaxi. (A) Antes da adsorção. (B) Pós-adsorção.



Fonte: Autora (2026).

A análise dos espectros FTIR da casca do abacaxi revelou a presença de grupos funcionais necessários na adsorção de corantes. A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) opera com base no princípio de que as moléculas absorvem luz infravermelha em frequências específicas, que correspondem aos modos vibracionais de suas ligações químicas. O espectro de absorção resultante serve como uma impressão digital molecular, permitindo a identificação e caracterização de diversas substâncias orgânicas e inorgânicas. As partes das moléculas que determinam as principais propriedades químicas dos compostos, ou seja, os grupos funcionais, absorvem radiação infravermelha na mesma faixa de números de onda, mesmo que façam parte de compostos diferentes (PASIECZNA- PATKOWSKA, *et al.*, 2025).

O resultado do IV da casca do abacaxi antes e após a adsorção apresentaram bandas bastante semelhantes, indicando que os grupos funcionais se mantiveram inalterados após o processo. Verificou-se, nos dois espectros, bandas largas, dados nos comprimentos 3292 cm^{-1} e 3333 cm^{-1} que podem ser atribuídos a vibrações características dos grupos hidroxila (O–H) e amina (N–HX). Os picos mais fracos, nos comprimentos de 2925 e 2915 cm^{-1} correspondem às vibrações de alongamento C–H (ROSLI *et al.*, 2023; TIAN *et al.*, 2025).

As bandas em torno de 1626 cm^{-1} e 1637 cm^{-1} nos espectros foram associados à vibração de estiramento dos grupos carboxílicos (COOH), enquanto que próximo a 1028

cm^{-1} (observado nas duas amostras), atribui-se o a banda às vibrações assimétricas de alongamento do anel C-O-C (TIAN *et al*., 2025).

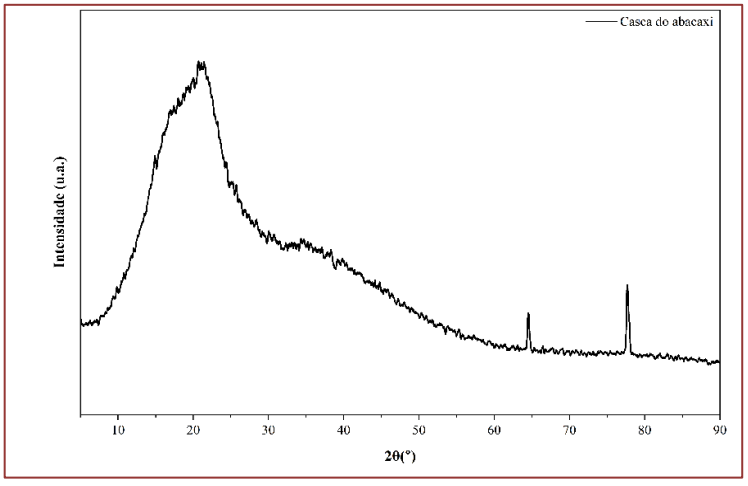
Aos comprimentos de 923 cm^{-1} e 883 cm^{-1}, relacionou-se as bandas às deformações externas do alongamento aromático C–H, em consonância com os estudos de Nuhoglu e Malkoc (2009).

Dessa forma, fez-se possível verificar a presença de grupos funcionais favoráveis, em termos de afinidade eletrostática, ao processo da adsorção do corante azul de metileno ao bioadsorvente. Além disso, embora haja semelhança entre os dois espectros apresentados, verifica-se a presença de algumas bandas divergentes, podendo indicar a ocupação pelas moléculas do corante dos sítios disponíveis na casca do abacaxi.

3.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A análise de DRX da amostra apresenta um pico em torno de 20° associado à celulose I cristalina, sendo uma estrutura frequentemente encontrada na celulose natural. A presença do pico em aproximadamente 22º nas curvas de DRX para as frações lignocelulósicas indicam que a secagem do material não promoveu alterações significativas dos componentes da matriz lignocelulósica (CARVALHO *et al.*, 2025). Segundo os autores, os picos menos protuberantes, localizados entre 65º e 80º estão mais relacionados às características minerais do que as estruturas orgânicas (lignina, hemicelulose e celulose) da casca do abacaxi.

Figure 5. Espectro do DRX da casca do abacaxi.



Fonte: Autora (2026).

3.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO BIOADSORVENTE NO PROCESSO DE ADSORÇÃO DO AZUL DE METILENO

3.3.1. INFLUÊNCIA DO PH

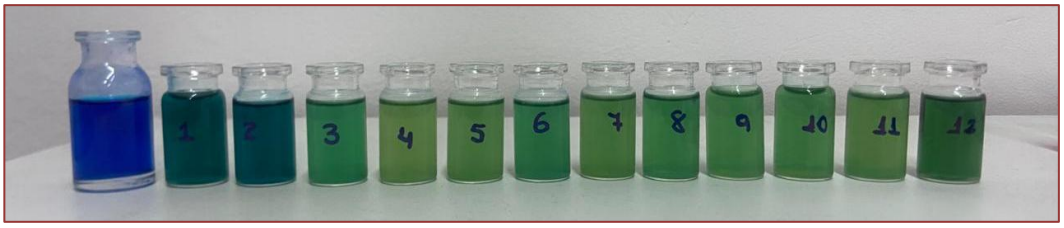
Na Tabela 3, constam os resultados para o estudo de influência do pH.

Tabela 3. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo de influência do pH.

pH	Conc. ($mg.L^{-1}$)	%Rem	$Q_{eq}(mg.g^{-1})$
1	14,58	75,4	4,476
2	19,73	66,8	3,961
3	6,87	88,4	5,247
4	3,75	93,7	5,559
5	3,96	93,3	5,538
6	5,95	90,0	5,339
7	3,87	93,5	5,547
8	5,75	90,3	5,359
9	5,06	91,5	5,428
10	4,86	91,8	5,448
11	3,89	93,4	5,545
12	4,73	92,0	5,461

Fonte: Autora (2026).

Figura 5. Resultados de remoção para o estudo de influência do pH.

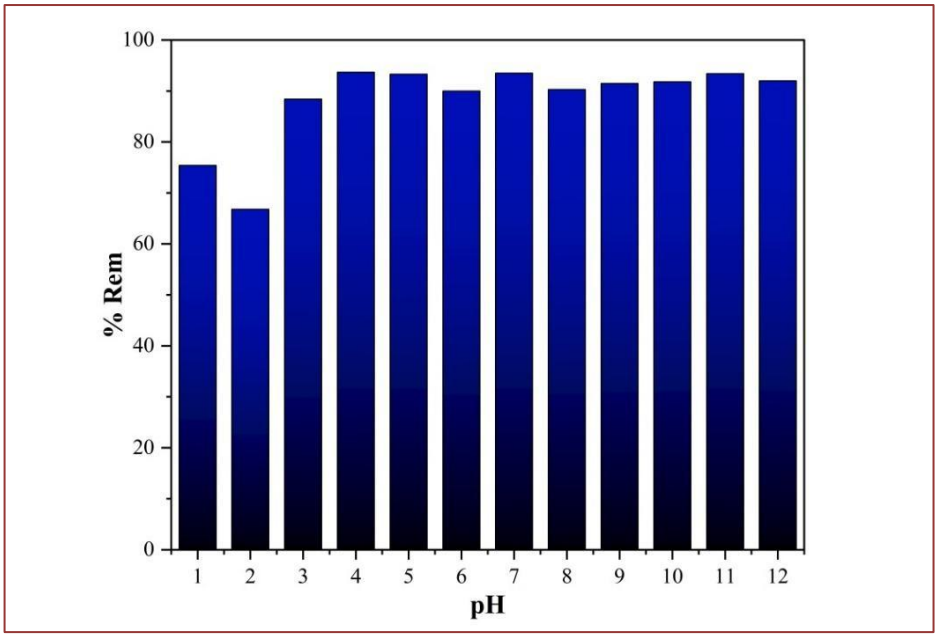


Fonte: Autora (2026).

Nos estudos de adsorção, o pH tem influência na medida em que determina o grau de distribuição das espécies químicas. A intensidade desse efeito pode ser maior ou menor conforme o adsorvente, uma vez que as cargas da superfície do adsorvente dependem da sua composição e das características da superfície (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Na Figura 6, verifica-se um comparativo entre os valores de pH estudados.

Figura 6. Estudo da influência do pH.



Fonte: Autora (2026).

De acordo com os resultados observados, nota-se que a eficiência de adsorção do corante azul de metileno foi mais elevada a partir do pH 4, com 93,7% de remoção, mantendo-se praticamente constante em meios mais básicos. Nos estudos de Cárdenas *et al*. (2021), o ponto de carga zero (pH_{pzc}) da casca do abacaxi foi determinado em aproximadamente 5,0, indicando que em pH inferiores a esse valor a superfície tende a apresentar carga positiva, enquanto em pH próximos ou ligeiramente inferiores ocorre equilíbrio de cargas superficiais que ainda permite interação com espécies catiônicas por meio de grupos parcialmente ionizados. Desta forma, dada a natureza eletrônica do corante azul de metileno, comprova-se que a medida que a superfície do corante torna-se mais carregada negativamente, a adsorção é favorecida pelas interações eletrostáticas.

3.3.2. ESTUDO CINÉTICO

Os resultados de remoção para o estudo cinético, considerando o pH ótimo (igual a 4) avaliado no estudo anterior, estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo cinético. Condições experimentais: pH=4; T=25 °C; m=0,5 g; V=50 mL; A=200 rpm.

Tempo de agitação (min)	Conc. ($mg.L^{-1}$)	%Rem	Q_{eq} ($mg.g^{-1}$)
2	9,760	82,57	4,62
5	8,020	85,68	4,80
10	7,220	87,11	4,88
15	7,380	86,82	4,86
20	6,070	89,16	4,99
30	5,880	89,50	5,01
40	5,190	90,73	5,08
50	5,550	90,09	5,05
60	5,170	90,77	5,08
80	5,090	90,91	5,09
100	4,860	91,32	5,11
120	4,040	92,79	5,20

Fonte: Autora (2026).

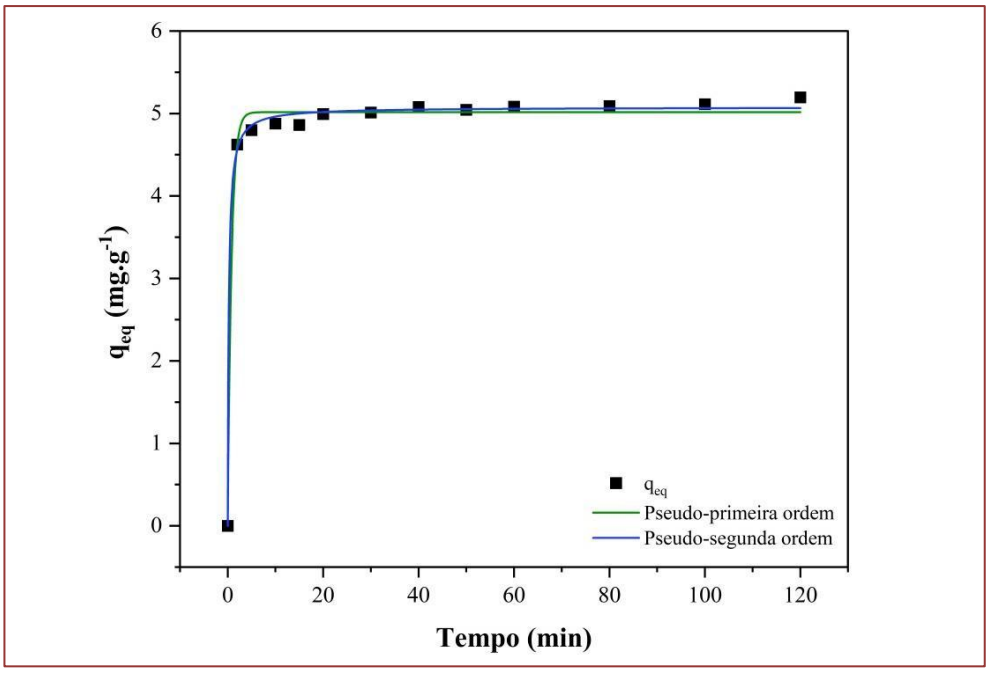
O aspecto visual de remoção pode ser verificado a partir da fotografia apresentada na Figura 7, onde novamente a coloração esverdeada apresentou-se no material filtrado.

Figura 7. Resultados de remoção para o estudo cinético

Fonte: Autora (2026).

A cinética de adsorção expressa a taxa de remoção do adsorvato em função do tempo. O estudo cinético do corante azul de metileno foi realizado para verificar o tempo necessário para o sistema atingir o equilíbrio de adsorção. A Figura 8 refere-se a aplicação e ajuste dos modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. A partir dos resultados obtidos nos ensaios cinéticos foi verificado que o tempo de adsorção foi muito rápido no estágio inicial do período de contato, estendendo-se gradualmente até o tempo máximo de 120 minutos.

Figura 8. Cinética de adsorção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi, incluindo ajustes não lineares para os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.



Fonte: Autora (2026).

Na Tabela 5 estão apresentados os valores dos coeficientes de determinação R^2, bem como os demais parâmetros calculados através da aplicação de regressão sobre os dados experimentais e os respectivos modelos cinéticos.

Tabela 5. Parâmetros cinéticos obtidos para os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Modelo	Parâmetro	Valor
Pseudo-primeira Ordem	Q_e(mg.g^{-1})	5,01578±0,0347
	K_1 (min^{-1})	1,25982±0,1476
	R^2	0,99378
	SQR	0,01311
Pseudo-segunda Ordem	Q_e(mg.g^{-1})	5,07518±0,0254
	K_2(g.mg^{-1}.min^{-1})	0,86933±0,1441
	R^2	0,99753
	SQR	0,00521

Fonte: Autora (2026).

O melhor ajuste de modelo cinético, evidenciado pelo valor do R^2, foi o de pseudo-segunda ordem, o que sugere que o processo de adsorção é governado predominantemente por interações químicas entre o adsorvato e os sítios ativos do adsorvente, envolvendo compartilhamento ou troca de elétrons entre as espécies, característica típica de processos de quimissorção (HO; MCKAY, 1999).

3.3.3. ISOTERMAS

De maneira similar aos demais estudos, a Tabela 6 reúne os resultados de remoção do corante azul de metileno para diferentes concentrações, caracterizando o ensaio das isotermas.

Tabela 6. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo das isotermas. Condições experimentais: pH=4; T=25 °C; m=0,5 g; V=50 mL; A=200 rpm.

Conc. Solução ($mg.L^{-1}$)	Conc. ($mg.L^{-1}$)	%Rem	qeq ($mg.g^{-1}$)
20	1,950	90,3	1,81
40	4,100	89,8	3,59
60	6,740	88,8	5,33
80	9,600	88,0	7,04
100	11,870	88,1	8,81
120	14,330	88,1	10,57
140	16,640	88,1	12,34
160	25,800	83,9	13,42
180	31,100	82,7	14,89
200	40,400	79,8	15,96
250	51,100	79,6	19,89

Fonte: Autora (2026).

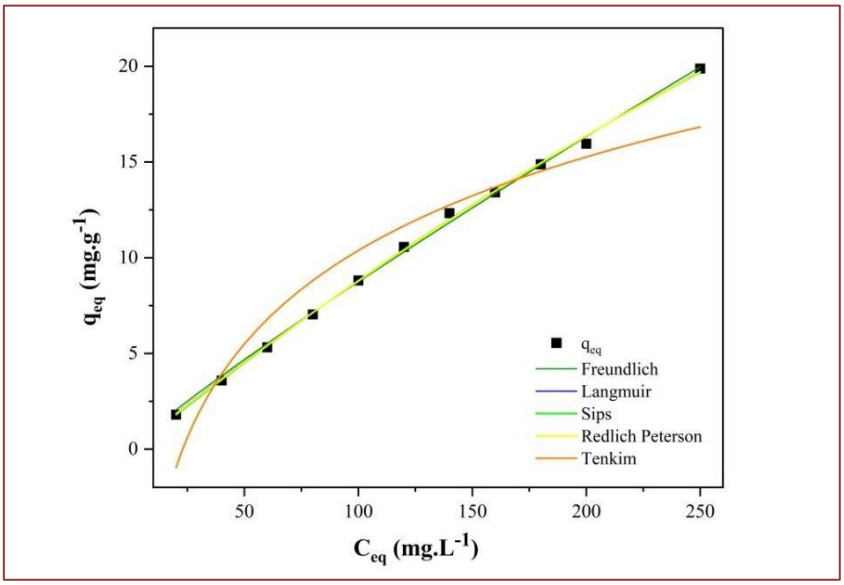
Quando o adsorvato entra em contato com o adsorvente, ocorre a transferência de moléculas ou íons da solução aquosa para a superfície do material adsorvente. Esse processo continua até que se estabeleça um balanço entre as espécies presentes na fase líquida e aquelas retidas na superfície do adsorvente. Nesse momento, a concentração do soluto na solução permanece constante (C_eq), caracterizando o estado de equilíbrio, no qual é possível determinar a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_eq) do adsorvente (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Figura 9. Resultados de remoção para o estudo das isotermas

Fonte: Autora (2026).

Os resultados das curvas obtidas para o equilíbrio de adsorção da casca do abacaxi em pH 4 estão representados na Figura 10. As equações de Langmuir, Freundlich, Temkin, Sips e Redlich-Peterson foram empregadas e ajustadas aos dados experimentais.

Figura 10. Isoterma de adsorção do azul de metileno e ajuste não linear utilizando os modelos de Freundlich, Langmuir, Sips, Redlich–Peterson e Temkin.



Fonte: Autora (2026).

Da análise gráfica, pode-se aferir que a maioria dos modelos se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais, de modo que traçam a forma de isoterma linear. Segundo Nascimento (2020), as curvas das isotermas lineares representam uma relação de proporcionalidade entre a massa retida do adsorvato por unidade de massa do adsorvente e a concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida. Os principais parâmetros para os modelos implementados estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros obtidos para as equações de Freundlich, Langmuir, Sips, Redlich-Peterson e Temkin para o corante azul de metileno utilizando a casca do abacaxi.

Modelo	Parâmetro	Valor0,0128
Freundlich	K_F(mg.g^{-1})	0,137±0,0128
	1/n	1,109±0,0226
	R^2	0,99798
	SQR	0,07035
Langmuir	Q_{sat} (mg.g^{-1})	116,235±15,726
	K_L(mg.g^{-1})	8,186E-04±1,27E-04
	R^2	0,99875
	SQR	0,04368
Sips	q_{sat}(mg.g^{-1})	93,385±27,882
	K_S	0,0012±5,67E-04
	n	1,044±0,0715
	R^2	0,99881
	SQR	0,04672
Redlich-Peterson	K_{RB}(mg.L^{-1})	0,09343±0,0059
	a_{RB}(mg.L^{-1})	2,719E-04±0,0011
	β	1,18101±0,6842
	R^2	0,99876
	SQR	0,04851

Fonte: Autora (2026).

Os resultados obtidos para o equilíbrio de adsorção indicaram que o modelo de Sips apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, apresentando coeficiente de determinação (R^2) de 0,99881, superior aos demais modelos avaliados. O bom ajuste do modelo de Sips indica que, em baixas concentrações, o sistema apresenta comportamento semelhante ao modelo de Freundlich, enquanto em concentrações mais elevadas tende a se aproximar do modelo de Langmuir, confirmando a heterogeneidade do sistema de adsorção. Dessa forma, os resultados reforçam a complexidade da superfície do adsorvente e confirmam sua capacidade de interação eficiente com o adsorvato em diferentes condições de concentração (DANAT *et al.*, 2026).

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o potencial do bioadsorvente obtido a partir de biomassa residual do abacaxi para a remoção de contaminantes em solução aquosa por meio do processo de adsorção.

A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) permitiu identificar os principais grupos funcionais típicos de materiais lignocelulósicos na superfície do bioadsorvente. Após o processo de adsorção, foram observadas alterações na intensidade e deslocamentos das bandas, indicando a interação entre o adsorvato e os sítios ativos do adsorvente. Dessa forma, a análise de FTIR corroborou os resultados cinéticos e isotérmicos obtidos, reforçando a hipótese de que o processo de adsorção envolve interações químicas entre o adsorvato e a superfície do material.

Os estudos de influência do pH demonstraram que a condição mais favorável para o processo de adsorção ocorreu em pH 4, mantendo-se constante até a faixa mais alcalina, indicando que este meio favorece as interações entre o adsorvato e os sítios ativos presentes na superfície do material adsorvente, dada a natureza eletrônica de ambos os materiais.

A análise dos dados cinéticos mostrou que o modelo cinético de pseudo-segunda ordem apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, sugerindo que o processo de adsorção é controlado predominantemente por interações químicas entre o adsorvato e os sítios ativos do adsorvente.

Em relação ao equilíbrio de adsorção, verificou-se que o modelo de isoterma de Sips foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. Esse modelo combina características das isotermas de Langmuir e Freundlich, sendo adequado para descrever sistemas heterogêneos de adsorção. O bom ajuste obtido indica, segundo a literatura, que a superfície do adsorvente apresenta diferentes tipos de sítios ativos, além de sugerir que o processo tende a apresentar comportamento semelhante ao modelo de Langmuir em altas concentrações do adsorvato.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o material adsorvente estudado apresenta potencial para aplicação em processos de remoção de corantes em meio aquoso, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis no tratamento de efluentes. Além disso, a utilização de materiais de baixo custo e/ou derivados de resíduos agroindustriais valida a agregação de valor a resíduos e a redução de impactos ambientais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). As autoras Heloyse Reges Chaves e Ana Vitória Santos Marques agradecem ao programa MAI/DAI/CNPq pela concessão de bolsas de Iniciação Tecnológica Industrial (ITI), processos nº 181465/2025-6 e nº 181175/2025-8, respectivamente.

REFERÊNCIAS

[1] AL-ASADI, S. T.; MUSSA, Z. H.; AL-QAIM, F. F.; KAMYAB, H.; AL-SAEDI, H. F. S.; DEYAB, I. F.; KADHIM, N. J. A comprehensive review of methylene blue dye adsorption on activated carbon from edible fruit seeds: a case study on kinetics and adsorption models. Carbon Trends, [S.L.], v. 20, p. 100507, ago. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100507.

[2] CÁRDENAS, C. V., et al. Determination of the point of zero charge of pineapple (Ananas comosus L.) peel and its application as copper adsorbent. **Agro productividad**, 26 nov. 2021.

[3] CARVALHO, M. et al. Valorização Da Casca Do Abacaxi Via Pirólise Catalítica Sobre A Zeólita MCM-22. **23º CBCAT – Congresso Brasileiro de Catalise**, v. 1, n. 1, 2025.

[4] DANAT, B.T., WUANA, R.A., CHAHUL, H.F. *et al.* Review of adsorption isotherms models. *Appl Water Sci* **16**, 72 (2026). https://doi.org/10.1007/s13201-025-02682-0

[5] HABIBU, S.; LADAN, M.; SAFANA, A. A.; DANDALMA, Z. A.; SALEH, I.; ABDULLAHI, S. R. Optimization of Methylene Blue Adsorption onto Activated Carbon derived from Pineapple Peel Waste using Response Surface Methodology. **Umyu Scientifica**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 45-55, 30 dez. 2023. Umaru Musa YarAdua University Katsina NG. http://dx.doi.org/10.56919/usci.2324.006.

[6] HO, Y.S; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 451-465, jul. 1999. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0032-9592(98)00112-5.

[7] JAWAD, A. H.; ABDULHAMEED, A. S.; KHADIRAN, T.; ALOTHMAN, Z. A.; WILSON, L. D.; ALGBURI, S. Response surface methodology for optimizing methylene blue dye removal by mesoporous activated carbon derived from renewable woody Bambusoideae waste. **International Journal Of Phytoremediation**, [S.L.], v. 26, n. 5, p. 727-739, 10 out. 2023. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2023.2262040.

[8] KANT, R. Textile dyeing industry an environmental hazard. **Natural Science**, [S.L.], v. 04, n. 01, p. 22-26, 2012. Scientific Research Publishing, Inc.. http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.41004.

[9] NASCIMENTO, R. F. et al. Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária - UFC, 2014.

[10] NUHOGLU, Y.; MALKOC, E.. Thermodynamic and kinetic studies for environmentaly friendly Ni(II) biosorption using waste pomace of olive oil factory. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 100, n. 8, p. 2375-2380, abr. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.016.

[11] OLIVEIRA, F. F. de; MOURA, K. O.; COSTA, L. S.; VIDAL, C. B..; LOIOLA, A. R.; NASCIMENTO, R. F. do. Reactive Adsorption of Parabens on Synthesized Micro- and Mesoporous Silica from Coal Fly Ash: ph effect on the modification process. **Acs Omega**, [S.L.], v. 5, n. 7, p. 3346-3357, 11 fev. 2020. American Chemical Society (ACS). http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.9b03537.

[12] PASIECZNA-PATKOWSKA, S.; CICHY, M.; FLIEGER, J. Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy in Characterization of Green Synthesized Nanoparticles. **Molecules**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 684, 4 fev. 2025. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/molecules30030684.

[13] RAFATULLAH, M..; SULAIMAN, O.; HASHIM, R.; AHMAD, A. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 177, n. 1- 3, p. 70-80, maio 2010. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047.

[14] ROSLI, N. A.; AHMAD, M. A.; NOH, T. U. Nature's waste turned savior: optimizing pineapple peel‐based activated carbon for effective remazol brilliant violet dye adsorption using response surface methodology. **Inorganic Chemistry Communications**, [S.L.], v. 153, p. 110844, jul. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110844.

[15] SILVA, F.; NASCIMENTO, L.; BRITO, M.; SILVA, K.; PASCHOAL, W.; FUJIYAMA, R. Biosorption of Methylene Blue Dye Using Natural Biosorbents Made from Weeds. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 15, p. 2486, 5 ago. 2019. MDPI AG.

[16] TIAN, Y.; HUANG, R.; CHEN, Y.; WANG, T.; WU, J.; WANG, S. The preparation and characterization of pineapple peel cellulose nanofibers and its application in oil-water emulsions. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 353, p. 123245, abr. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123245.

Capítulo 9

Valorização do resíduo de bauxita por meio da adsorção do corante vermelho congo

Ana Vitória Santos Marques
Heloyse Reges Chaves
Tellys Lins Almeida Barbosa
Meiry Gláucia Freire Rodrigues

Resumo: A indústria têxtil é uma das maiores geradoras de efluentes contendo corantes sintéticos, os quais apresentam elevada estabilidade e toxicidade, dificultando sua remoção por métodos convencionais. Nesse contexto, o uso de resíduos industriais como adsorventes surge como uma alternativa sustentável e de baixo custo. Este trabalho tem como objetivo caracterizar e avaliar o potencial do resíduo de bauxita regenerado como adsorvente no processo de remoção de corantes têxteis de um efluente sintético. O resíduo foi submetido a secagem, desaglomeração e caracterização pelas técnicas de Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X e Espectrometria na Região do Infravermelho, sendo posteriormente aplicado na adsorção do corante Vermelho Congo. A cinética de adsorção foi analisada por meio dos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, ajustados de forma não linear aos dados experimentais. Ambos os modelos apresentaram boa correlação com os valores experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,97774 e 0,97869, respectivamente. O estudo das isotermas indicou que o modelo de Freundlich proporcionou o melhor ajuste, sugerindo uma adsorção favorável e uma superfície heterogênea do resíduo de bauxita. Os resultados demonstram o potencial do material como adsorvente alternativo para tratamento de efluentes contendo corantes.

Palavras-chaves: Adsorvente de baixo custo, Tratamento de efluentes, Reaproveitamento de resíduos, Cinética de adsorção, Remoção de corantes.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de água tem aumentado significativamente em todo o mundo. Entretanto, devido à oferta limitada, à má gestão e à competição entre diferentes setores, a disponibilidade de água para todos os usos permanece restrita. O crescimento populacional, a urbanização, a industrialização e as mudanças climáticas intensificam ainda mais essa preocupação global com o acesso à água (Tortajada; Nambiar, 2019).

A indústria têxtil é responsável por aproximadamente 20% da poluição industrial das águas, devido aos grandes volumes de efluentes gerados. Sob a perspectiva ambiental, este setor é considerado potencialmente poluidor, em função tanto dos processos produtivos quanto do descarte inadequado dos resíduos líquidos (Rondon et al., 2015; Melo, 2005; Robinson et al., 2000).

Os corantes presentes nos efluentes têxteis acabam se acumulando em corpos d'água, representando risco para os ecossistemas aquáticos. Esses resíduos não são inertes, interagindo com o meio e sendo retidos por organismos que, por sua vez, os incorporam à cadeia alimentar, gerando impactos em todos os níveis tróficos. Além disso, a presença de corantes compromete a fotossíntese de microrganismos, afetando diretamente a saúde do ecossistema (Gul, 2018).

Diversos métodos têm sido empregados para o tratamento de efluentes contendo corantes, como coagulação, troca iônica, processos eletroquímicos e adsorção. Dentre esses, a adsorção se destaca devido à simplicidade operacional, à ausência de subprodutos tóxicos e à elevada eficiência na remoção de poluentes (Abdulhameed et al., 2025).

A adsorção é um fenômeno físico-químico em que um componente presente em uma fase líquida ou gasosa se fixa na superfície de um sólido. Os elementos retidos são chamados de adsorvatos, enquanto o sólido que promove essa retenção é denominado adsorvente. A interação entre adsorvente e adsorvato ocorre devido a forças de atração intermoleculares (Atkins & Paula, 2018).

O resíduo de bauxita, subproduto da extração de alumina, apresenta alto caráter alcalino e é gerado em grandes quantidades. Globalmente, as indústrias de alumínio produzem cerca de 150 milhões de toneladas de resíduos de bauxita anualmente, totalizando mais de 2,7 bilhões de toneladas acumuladas, das quais apenas 15% são reutilizadas. Essa baixa taxa de aproveitamento evidencia a necessidade de estratégias eficazes para o tratamento e reaproveitamento desse resíduo (Tatiane, 2025).

O resíduo de bauxita tem sido explorado como adsorvente de baixo custo na remediação ambiental, sendo utilizado em estudos para a remoção de diferentes corantes de efluentes industriais (Antunes, 2021).

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso do resíduo de bauxita como adsorvente na remoção de corante têxtil a partir de um efluente sintético.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

A prospecção tecnológica foi realizada utilizando o software Questel Orbit ®. A busca foi conduzida com o termo "wastewater AND adsorption AND bauxite residue", abrangendo o período de 2003 a 2023.

As informações coletadas foram tratadas de forma quantitativa e analisadas quanto a:

- Número de patentes por ano, com o objetivo de identificar a evolução temporal dos depósitos;
- Distribuição das patentes por instituição ou empresa, destacando os principais detentores da tecnologia;
- Concentração de patentes por área de conhecimento, a fim de compreender os campos tecnológicos mais associados ao tema;
- Distribuição geográfica das patentes, para avaliar a atuação global dos países no desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao uso do resíduo de bauxita em processos de adsorção de efluentes.

2.2. PREPARO DO RESÍDUO DE BAUXITA

O resíduo de bauxita foi submetido a secagem em estufa a 100 ºC por 24 h, para a remoção da umidade residual. Em seguida, o material seco foi triturado em almofariz e pistilo para promover a desaglomeração das partículas. Após a etapa de desaglomeração, o resíduo foi peneirado em peneira Tyler de malha 65#, a fim de padronizar a granulometria utilizada nos ensaios de adsorção. Por fim, o material foi submetido a caracterizações.

2.3. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

Difração de Raios X – A análise foi realizada em um difratômetro Shimadzu XRD-6000, utilizando radiação CuKα (λ = 1,5406 Å), com tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. Os difratogramas foram obtidos no intervalo de 2θ entre 10° e 65°, com passo de 0,020° (2θ), tempo por passo de 1,0 s e velocidade de varredura de 2° (2θ)/min.

Espectroscopia na região do Infravermelho – Os espectros foram obtidos em um equipamento BRUKER VERTEX 70 FT-IR, na faixa de varredura de 4000 a 500 cm^{-1}.

Fluorescência de Raios X – A análise de composição química foi realizada em um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (Shimadzu EDX-720).

2.4. ESTUDO DA CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Os experimentos cinéticos foram realizados em erlenmeyers contendo 0,5 g do adsorvente e 50 mL da solução do corante Vermelho Congo (50 $mg{\cdot}L^{-1}$). As misturas foram submetidas à agitação em mesa agitadora por diferentes intervalos de tempo: 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 min.

Após cada tempo de contato, as amostras foram centrifugadas a 4000 rpm por 15 min, e a concentração final do corante foi determinada em espectrofotômetro UV-Vis.

Dessa forma foi possível calcular a porcentagem de remoção e a capacidade de remoção segundo o autor (Von Sperling, 2014):

$$\%Rem = \frac{(C_0 - C_f)}{C_f} * 100 \qquad \text{(Eq. 1)}$$

$$q - \frac{V}{m}(C_0 - C_f) \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Os dados experimentais foram então ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, de acordo com as equações apresentadas a seguir.

$$\frac{dq_t}{dt} - k_1 \cdot (q_e - q_t) \qquad \text{(Eq. 3)}$$

$$\frac{dq_t}{dt} - k_2 (q_e - q_t)^2 \qquad \text{(Eq. 4)}$$

onde:

k1 e k2 – constantes da taxa de adsorção do modelo de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem (min^{-1} e g/mg·min, respectivamente);

qe – quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g);

qt – quantidade adsorvida no instante t (mg/g).

2.5. ESTUDO DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

As isotermas de adsorção foram obtidas a partir de soluções do corante Vermelho Congo com concentrações iniciais de 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 200 e 250 $mg \cdot L^{-1}$. Em cada ensaio, foram utilizados 50 mL da solução e 0,5 g do resíduo de bauxita, mantidos sob agitação em mesa agitadora a 200 rpm por 50 min.

Após o tempo de contato estabelecido, as amostras foram centrifugadas e a concentração residual do corante foi determinada em espectrofotômetro UV-Vis.

Os resultados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos de isotermas de adsorção, conforme as equações apresentadas no Quadro 01.

Quadro 01. Modelos matemáticos das isotermas de adsorção.

Isotermas	Modelo
Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} k_L C_e}{1 + k_L C_e}$
Freundlich	$q_e = k_f (C_e)^{\frac{1}{n}}$
Temkin	$q_e = \frac{RT}{b} ln(k_T C_e)$

Fonte: Autoria própria (2026).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

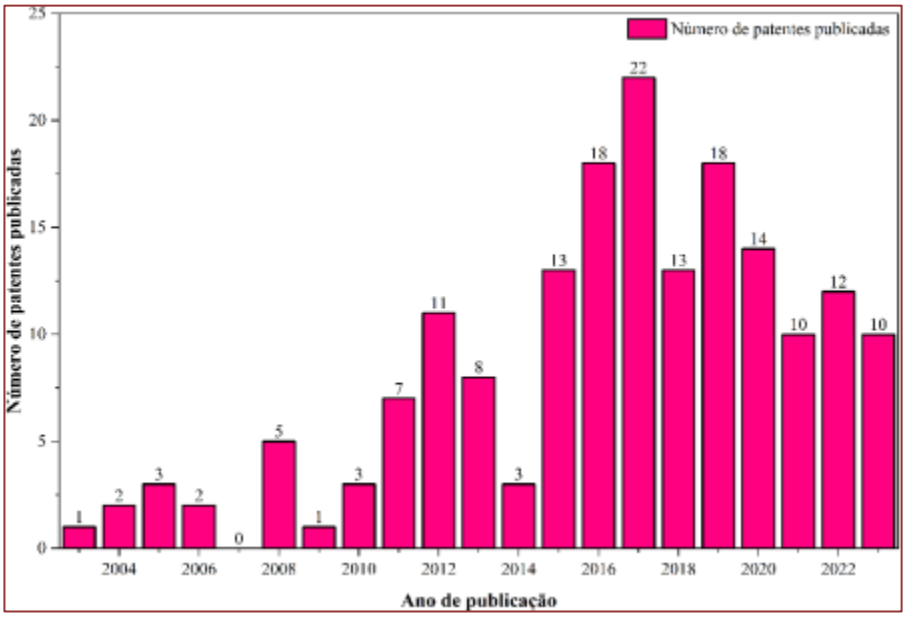
3.1. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

O monitoramento tecnológico consiste em uma ferramenta de inteligência tecnológica voltada para o mapeamento do desenvolvimento tecnológico, a identificação de novos mercados e o reconhecimento das competências de um determinado setor (Linhares *et al.*, 2018).

Segundo Coelho (2003), a prospecção tecnológica desempenha um papel essencial na gestão da informação, permitindo identificar o estado da arte de uma área tecnológica. Seu objetivo é fornecer dados sobre a evolução histórica, as tendências de mercado e a detecção de sinais emergentes que possam orientar decisões estratégicas e de inovação.

Nesse contexto, o monitoramento tecnológico deste estudo permitiu identificar o panorama de publicações de patentes relacionadas ao tema investigado. A Figura 01 apresenta a evolução anual do número de patentes publicadas entre 2003 e 2023, evidenciando o desenvolvimento tecnológico ao longo do período analisado.

Figura 01. Evolução anual do número de patentes publicadas (2003–2023).

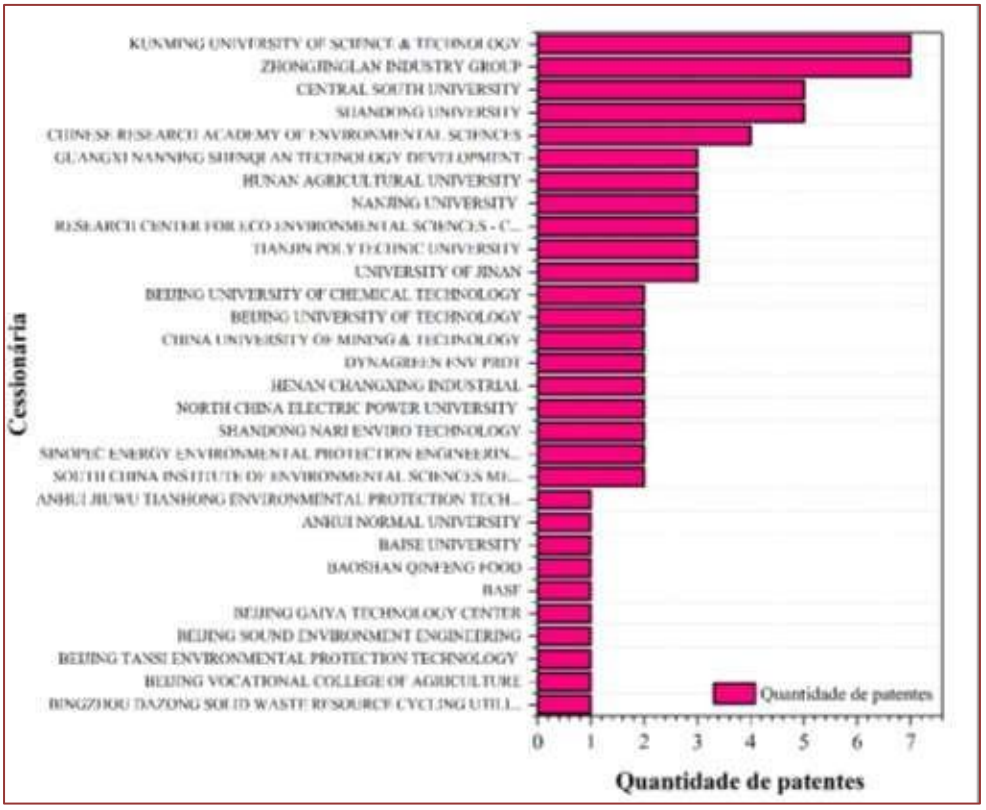


Fonte: Autoria própria (2026).

Em geral, observa-se que o número de patentes cresceu gradualmente até atingir um pico em 2017, indicando um período de forte atividade tecnológica na área. Nos primeiros anos (até 2009), a quantidade de registros foi menor, indicando estágio inicial de desenvolvimento ou baixo interesse do setor. Entre 2010 e 2017, observa-se um claro aumento, possivelmente associado à consolidação da tecnologia e ao avanço de pesquisas aplicadas. Após o ano de 2017, verifica-se leve redução e estabilização, o que pode representar maturidade tecnológica ou mudanças nas prioridades de inovação.

Após a análise temporal das publicações de patentes, a Figura 02 apresenta a distribuição das patentes por instituição ou empresa, permitindo identificar os principais detentores das tecnologias registradas.

Figura 02. Patentes distribuídas por instituição ou empresa.



Fonte: Autoria própria (2026).

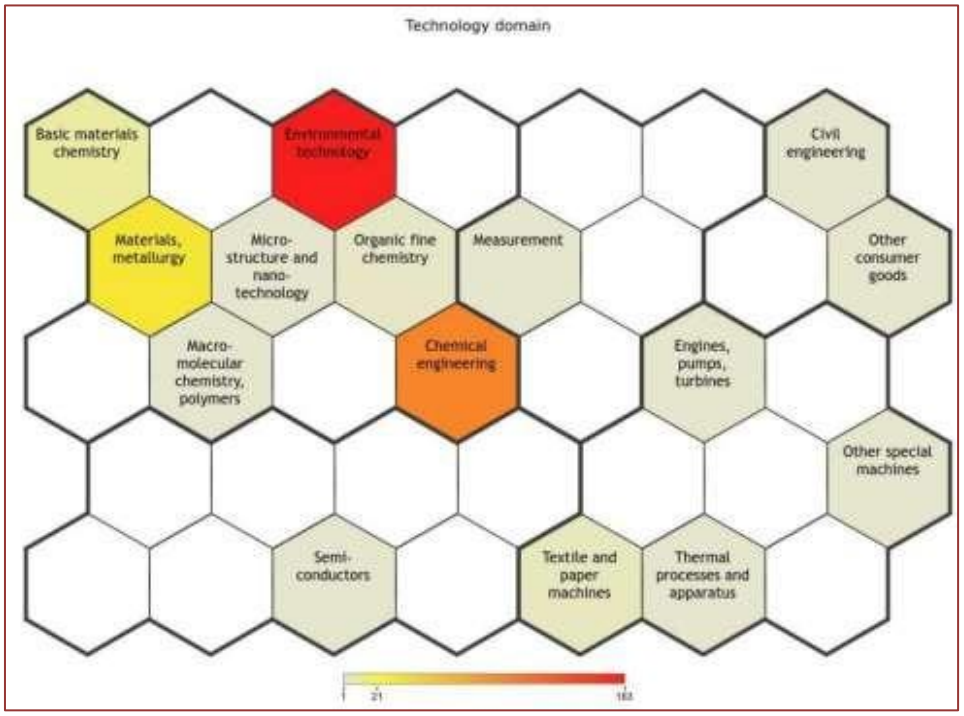
A Figura 02 aponta a concentração de registros principalmente em universidades e centros de pesquisa chineses. Dentre eles, sobressaem a Kunming University of Science & Technology e a Zhongjinglan Industry Group, que apresentam o maior número de patentes depositadas, seguidas pela Central South University e Shandong University.

Essa primazia de instituições acadêmicas mostra uma forte ligação do meio científico na geração de conhecimento e inovação tecnológica relacionada ao uso de resíduos de bauxita em processos de tratamento de efluentes. A presença de algumas empresas do setor industrial, mesmo que em menor número, ratifica o interesse na aplicação prática dessas tecnologias, sobretudo na gestão ambiental e recuperação de materiais.

Sem entrar em pormenores, verifica-se uma liderança da China no desenvolvimento tecnológico da área, refletindo políticas de incentivo à pesquisa e à sustentabilidade.

A partir da identificação dos principais agentes responsáveis pelos registros, buscou-se analisar as áreas de aplicação e os campos tecnológicos em que essas inovações estão inseridas. Essa relação é ilustrada na Figura 03, que mostra a distribuição das patentes por domínio tecnológico.

Figura 03. Distribuição das patentes por domínio tecnológico.

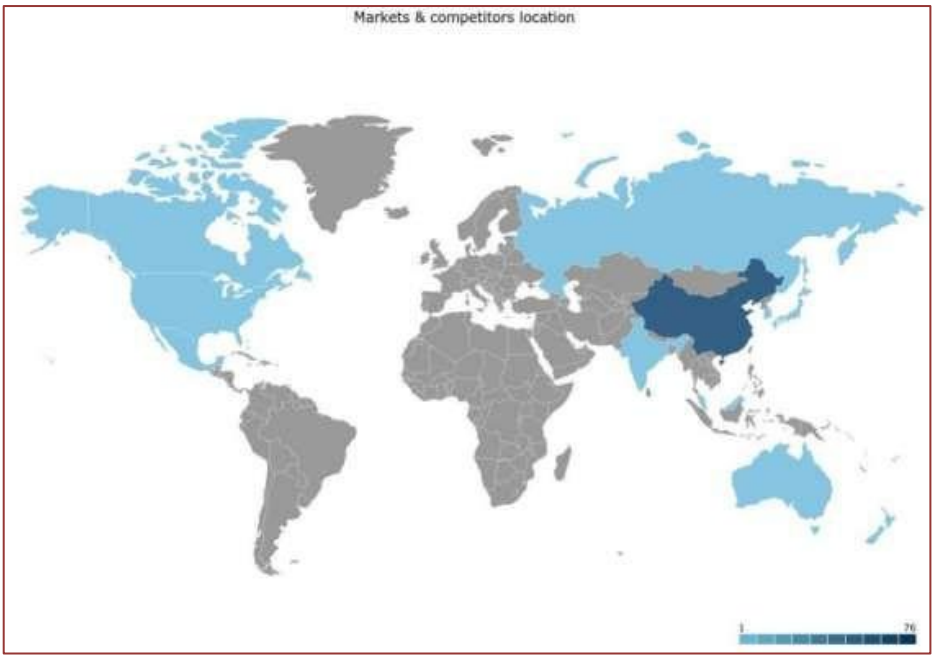


Fonte: Autoria própria (2026).

É visto que as áreas com maior concentração de registros são tecnologia ambiental, engenharia química e materiais e metalurgia, destacadas em tons de vermelho, laranja e amarelo, o que demonstra o crescente interesse em processos sustentáveis e eficientes para tratamento de efluentes e aproveitamento de resíduos. A área de maior concentração, tecnologia ambiental, exibe a pertinência de soluções voltadas à mitigação de impactos ambientais. A área engenharia química e materiais e metalurgia aparecem como áreas complementares, responsáveis pelo desenvolvimento de adsorventes, catalisadores e outras metodologias de tratamento.

Assim, considerando essa diversidade de áreas tecnológicas, torna-se relevante observar também como essas inovações estão distribuídas geograficamente. A Figura 04 apresenta a distribuição global das patentes, evidenciando os principais países e regiões que concentram o desenvolvimento dessas tecnologias.

Figura 04. Distribuição geográfica das patentes.



Fonte: Autoria própria (2026).

Por meio da Figura 04 é possível observar que o lugar onde há uma maior concentração de patentes é na China, indicando sua liderança no setor e o forte investimento em pesquisa e inovação tecnológica. Além disso, países como Estados Unidos, Canadá, Rússia, Japão, Índia e Austrália também aparecem com relevância, mostrando um aumento no interesse em escala global.

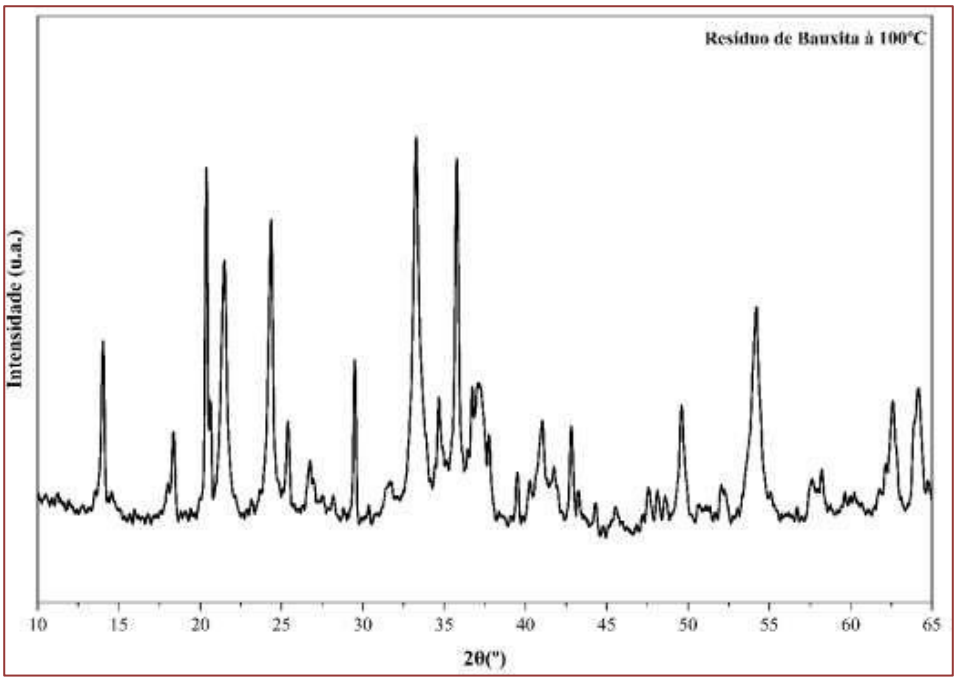
Essa distribuição indica que o avanço tecnológico na área é promovido principalmente por nações com capacidade industrial consolidada e políticas voltadas à inovação, enquanto regiões como América do Sul e África apresentam participação limitada, transparecendo um menor investimento em pesquisa aplicada e proteção intelectual.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO ADSORVENTE

A Figura 05 apresenta o difratograma de raios X do resíduo de bauxita submetido à secagem a 100 °C. É possível identificar a presença de diferentes fases cristalinas, entre as quais se destacam a sodalita ($Na_4Al_3Si_3O_{12}Cl$), hematita (α-Fe_2O_3), goetita (α-FeOOH), gibsita ($Al(OH)_3$), calcita ($CaCO_3$), anatásio (TiO_2) e quartzo (SiO_2) (Nascimento et. al., 2025, Brunori et al., 2005).

Observa-se que a hematita é a fase predominante no material, apresentando picos bem definidos e de elevada intensidade, característicos dessa estrutura cristalina. Além disso, o pico localizado em aproximadamente $2\theta = 22°$, é atribuído à gibsita, indicando sua presença significativa no resíduo analisado.

Figura 05. Difração de raios X do resíduo de bauxita.



Fonte: Autoria própria (2026).

A Tabela 01 apresenta a análise de fluorescência de raios x do resíduo de bauxita submetido à secagem a 100 °C.

Tabela 01. Análise química do resíduo de bauxita.

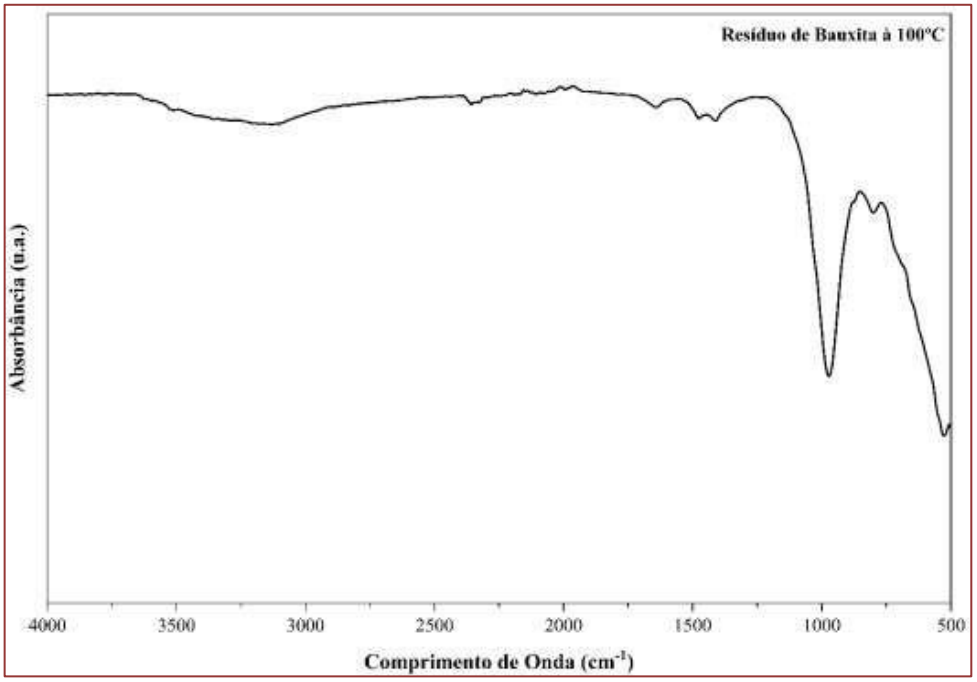
Composição	Na2O	Al2O3	Fe2O3	SiO2	TiO2	CaO	BaO	SO3	Outros
química (%)	30,046	29,483	23,491	11,791	2,292	1,924	0,590	0,209	0,97

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise química do resíduo de bauxita da refinaria ALUMAR mostra teores elevados de Na_2O, Al_2O_3 e Fe_2O_3, além de SiO_2 e TiO_2. O alto teor de sódio indica forte alcalinidade devido à presença de compostos de sódio remanescentes do processo Bayer. Apesar da variação na composição química, os resultados confirmam a predominância dos óxidos típicos do resíduo, como Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2, TiO_2 e Na_2O, o que caracteriza o material como um resíduo rico em óxidos metálicos e com potencial para reaproveitamento após neutralização (Garcia, 2012).

A Figura 06 apresenta os espectros de infravermelho do resíduo de bauxita submetido à secagem a 100 °C.

Figura 06. Espectros de infravermelho do resíduo de bauxita.



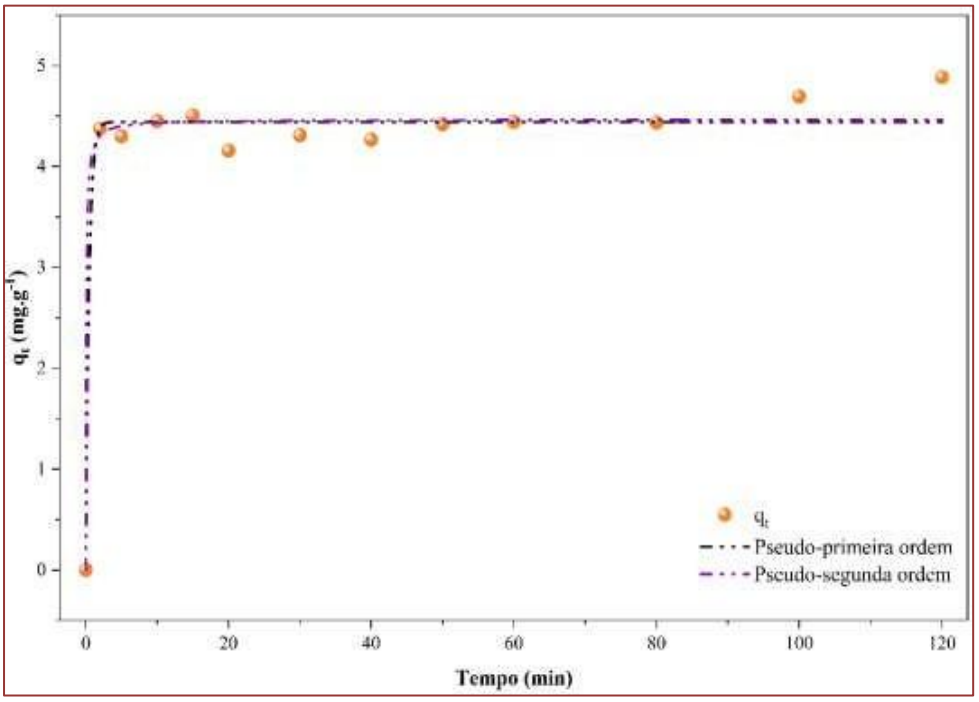
Fonte: Autoria própria (2026).

O espectro de infravermelho do resíduo de bauxita apresenta uma banda larga entre 3300 e 3000 cm^{-1}, associada aos modos de estiramento dos grupos O–H provenientes tanto de hidroxilas estruturais (presentes em silicatos e goethita) quanto de moléculas de água fortemente adsorvidas nos mesoporos do material. O sinal em 2360 cm^{-1} está relacionado à vibração do grupo H–O–H de água fracamente ligada à superfície. Parte dessa água fortemente adsorvida, juntamente com as hidroxilas, pode estar incorporada à fase amorfa do resíduo. A presença de carbonatos é evidenciada por uma banda intensa na região de 1420–1450 cm^{-1}, correspondente ao estiramento assimétrico da ligação C–O. O pico em 970 cm^{-1} indica a existência de ligações Si–O–Si(Al), enquanto a absorção em 525 cm^{-1} é atribuída às ligações Fe–O, típicas de óxidos de ferro presentes no material (Mucsi *et al.*, 2021).

3.3. CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Na Figura 07 apresenta-se a cinética de adsorção do corante Vermelho Congo na amostra de resíduo de bauxita e os ajustes de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Figura 07. Cinética de adsorção do corante Vermelho Congo em resíduo de bauxita.



Fonte: Autoria própria (2026).

A cinética de adsorção foi avaliada pelos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, ajustados de forma não linear aos dados experimentais. Observa-se, pelo gráfico da Figura 7, que ambos os modelos apresentaram boa correlação com os valores experimentais, descrevendo adequadamente o rápido processo de adsorção seguido do alcance do equilíbrio. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram de 0,97774 e 0,97869 (ver Tabela 02) para os modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, respectivamente, indicando ajustes praticamente equivalentes. A capacidade de equilíbrio calculada (q_e) foi semelhante para ambos os modelos, com valores de 4,44 e 4,46 mg·g^{-1}, confirmando a consistência dos resultados.

Tabela 02. Parâmetros obtidos para os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Parâmetros	qe	k	R^2
Pseudo-primeira ordem	4,4437 mg.g^{-1}	2,0945 min^{-1}	0,9777
Pseudo-segunda ordem	4,4663 mg.g^{-1}	3,0121 g.mg^{-1}.min^{-1}	0,9787

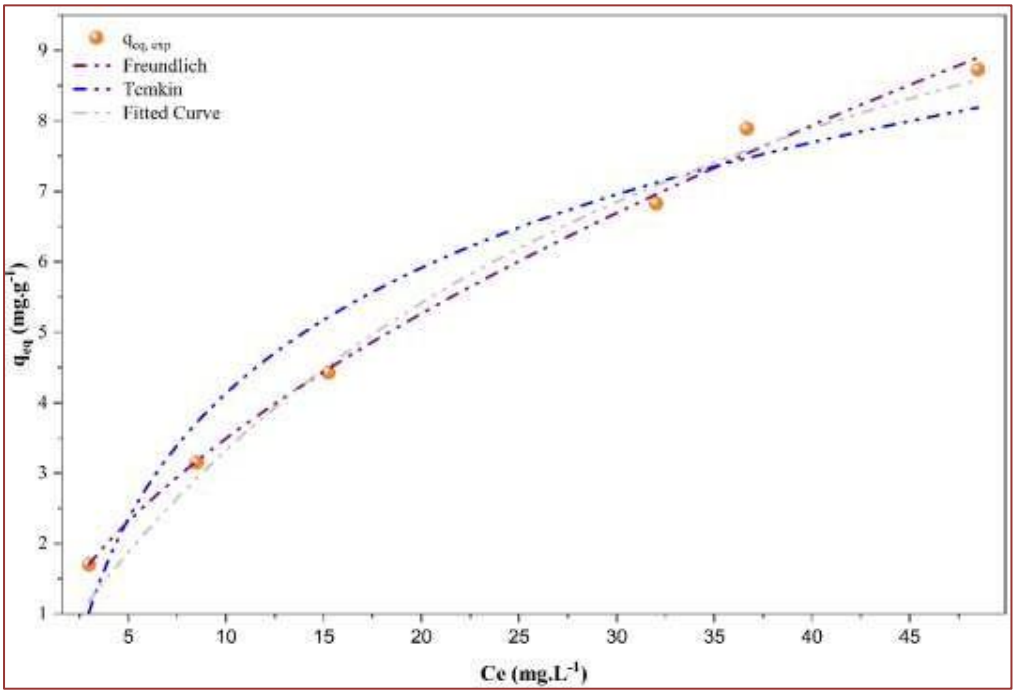
Fonte: Autoria própria (2026).

Conforme a Tabela 02, apesar da proximidade entre os parâmetros estatísticos, o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou ligeira superioridade no coeficiente de determinação, sugerindo que o processo de adsorção pode envolver interações químicas entre o corante Vermelho Congo e os grupos funcionais presentes na superfície do resíduo de bauxita, características de um mecanismo de quimissorção. De modo geral, o comportamento cinético evidencia uma etapa inicial muito rápida, possivelmente controlada pela difusão através da película externa, seguida por uma fase de equilíbrio praticamente constante após poucos minutos de contato. Assim, embora ambos os modelos descrevam bem os dados experimentais, o modelo de pseudo-segunda ordem representa de forma mais adequada o comportamento global do sistema avaliado.

3.4. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

As isotermas de adsorção para o resíduo de bauxita obtidas estão apresentadas na Figuras 08. Os modelos não lineares de Langmuir, Freundlich e Temkin foram ajustados aos dados experimentais, além disso, os parâmetros obtidos estão apresentados nas Tabelas 03.

Figura 08. Isotermas de adsorção do corante Vermelho Congo em resíduo de bauxita.



Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 03. Parâmetros obtidos para as isotermas de Langmuir, Freundlich e Temkin para o corante Vermelho Congo.

Modelo	Parâmetro	Valores
Langmuir	K_L	0,029 ($L.mg^{-1}$)
	q_{max}	14,564 ($mg.g^{-1}$)
	R^2	0,990
Freundlich	K_F	0,892 [$(mg.g^{-1})(L.mg^{-1})^{1/n}$]
	1/n	0,592
	R^2	0,995
Temkin	K_T	0,500 ($L.mg^{-1}$)
	B	2,568 ($mg.g^{-1}$)
	R^2	0,949

Fonte: Autoria própria (2026).

Os ajustes das isotermas pelos modelos de Freundlich, Langmuir e Temkin indicam comportamentos complementares sobre a adsorção do corante pelo resíduo de bauxita. O modelo de Freundlich apresentou o melhor ajuste, sugerindo adsorção favorável em uma superfície heterogênea com sítios de diferentes energias. O modelo de Langmuir também ajustou bem, indicando que é possível descrever o sistema por uma capacidade máxima teórica de monocamada dentro da faixa experimental analisada. O ajuste ao modelo de Temkin corrobora a presença de interações adsorvato–adsorvente de intensidade moderada. Em conjunto, os resultados apontam que a adsorção se manifesta principalmente em uma superfície heterogênea (Freundlich), mas que uma descrição por monocamada (Langmuir) também é compatível com os dados obtidos; o modelo de Temkin reforça que as interações não são desprezíveis.

4. CONCLUSÃO

O resíduo de bauxita da refinaria ALUMAR apresentou composição rica em óxidos metálicos, destacando-se hematita, goetita e gibsita, o que reforça seu potencial como material adsorvente. A cinética de adsorção do corante Vermelho Congo foi melhor descrita pelo modelo de pseudo-segunda ordem, indicando predominância de interações químicas entre o adsorbato e a superfície do resíduo. Entre as isotermas avaliadas, o modelo de Freundlich apresentou o melhor ajuste, sugerindo uma superfície heterogênea e adsorção favorável, enquanto os modelos de Langmuir e Temkin também demonstraram boa adequação. Assim, é possível dizer que o resíduo de bauxita é um adsorvente promissor para remoção de corantes têxteis, contribuindo para o reaproveitamento de um subproduto industrial e para o desenvolvimento de processos ambientalmente sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). As autoras Ana Vitória Santos Marques e Heloyse Reges Chaves agradecem ao programa MAI/DAI/CNPq pela concessão de bolsas de Iniciação Tecnológica Industrial (ITI), processos nº 181175/2025-8 e nº 181465/2025-6, respectivamente.

REFERÊNCIAS

[1] ABDULHAMEED, Ahmed Saud; OMARI, Rima Heider Al; YOUNES, Mohammad K.; ALGBURI, Sameer. Carboxylated chitosan-phthalate/ZrO2 nanocomposite for removal of methylene blue dye: characterization and adsorption modeling via response surface methodology. **Journal Of Molecular Structure**, [S.L.], v. 1339, p. 142386, set. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142386.

[2] ANTUNES, Maria Lucia Pereira; CONCEIÇÃO, Fabiano Tomazini; NAVARRO, Guillermo Rafael Beltran; FERNANDES, Alexandre Martins; DURRANT, Steven Frederick. Use of red mud activated at different temperatures as a low cost adsorbent of reactive dye. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 26, n. 5, p. 805-811, out. 2021. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220180180.

[3] ATKINS, Peter; PAULA, Julio de; KEELER, James. **Physical Chemistry**. 11. ed. S.L: Oxford University Press, 2018. 472 p.

[4] COELHO, G. M. Prospecção tecnológica: metodologias e experiências nacionais e internacionais. Rio de Janeiro: INT, 2003.

[5] GARCIA, Marta Cristina Suarez. **Modificação do resíduo de bauxita gerado no processo bayer por tratamento térmico**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Engenharia Metalúrgica e de Materiais II, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

[6] GUL, U.D. Bioremediation of Dyes in Textile Wastewater. **Turkish Journal of Scientific Reviews**, p. 24-28, 2018.

[7] LINHARES, Aline Marques Ferreira; GRANDO, Rafaela Lora; BORGES, Cristiano Piacsek; FONSECA, Fabiana Valeria da. Technological Prospection on Membranes Containing Silver Nanoparticles for Water Disinfection. **Recent Patents On Nanotechnology**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 3-12, 14 fev. 2018. Bentham Science Publishers Ltd.. http://dx.doi.org/10.2174/1872210511666170920144342.

[8] MELO, Aline. **Otimização do reuso de água em lavadores contínuos da indústria têxtil**. 2005. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

[9] MUCSI, Gábor; HALYAG, Nóra; KURUSTA, Tamás; KRISTÁLY, Ferenc. Control of Carbon Dioxide Sequestration by Mechanical Activation of Red Mud. **Waste And Biomass Valorization**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 6481-6495, 15 maio 2021. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s12649-021-01466-2.

[10] NASCIMENTO, Tatiane Maria do; GAMBARRA, Francimarcio Geraldo da Silva; RODRIGUES, Meiry Gláucia Freire. Valorization of Bauxite Residue for Use as Adsorbent for Reactive Blue Removal: regeneration evaluation. **Processes**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 251, 16 jan. 2025. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/pr13010251.

[11] ROBINSON, Tim; MCMULLAN, Geoff; MARCHANT, Roger; NIGAM, Poonam. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 77, n. 3, p. 247-255, maio 2001. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00080-8.

[12] RONDON, G.G.; MARCONDES, M.A.; SOUZA, V.A.F.; ITAYA, N.M.; GONÇALVES, A.M.M. Implantação de sistema de aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis em residências na cidade de São Paulo. Atas de Saúde Ambiental - ASA (São Paulo, Online), v.3, p. 60-65, 2015.

[13] TORTAJADA, Cecilia; NAMBIAR, Sunil. Communications on Technological Innovations: potable water reuse. **Water,** [S.L.], v. 11, n. 2, p. 251, 31 jan. 2019. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/w11020251.

[14] Von Sperling, M. (2014). **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG. 4ª ed., 472 p.

Capítulo 10

Membranas verdes para um futuro azul: remoção de azul de metileno com serragem da madeira

João Victor Silva Sousa
Ana Vitória Santos Marques
Heloyse Reges Chaves
Francirmarcio Geraldo da Silva Gambarra
Tellys Lins Almeida Barbosa
Meiry Gláucia Freire Rodrigues

Resumo: A elevada geração de efluentes contaminados pela indústria têxtil demanda o desenvolvimento de tecnologias eficientes e sustentáveis para o tratamento de águas residuárias. Neste estudo, foram produzidas membranas cerâmicas de baixo custo utilizando argila chocobofe, caulim e serragem de madeira como agente porogênico, visando à remoção do corante azul de metileno. Assim, quatro formulações foram preparadas e caracterizadas por diferentes técnicas como DRX, resistência mecânica e porosidade e avaliadas em ensaios de separação em fluxo contínuo. Os resultados demonstraram que a membrana contendo maior teor de serragem (WS3) apresentou a maior eficiência de remoção de 93,35% e boa resistência mecânica (12,81 MPa). Os resultados mostram o potencial das membranas cerâmicas produzidas com resíduos lignocelulósicos como alternativa sustentável e promissora para o tratamento de efluentes têxteis.

Palavras-chaves: Resíduos lignocelulósicos, Tratamento de efluentes, Reaproveitamento de resíduos.

1. INTRODUÇÃO

A exploração intensiva dos recursos naturais desde a Revolução Industrial (século XVIII-XIX) intensificou-se ao longo dos séculos, especialmente com o crescimento industrial, gerando impactos ambientais significativos. Entre os setores mais poluentes, a indústria têxtil se destaca, consumindo anualmente cerca de 93 bilhões de metros cúbicos de água ao longo de toda a sua cadeia produtiva (Silva et al., 2024). Os efluentes gerados nesse processo são compostos por corantes sintéticos, metais pesados e outros poluentes de difícil degradação, comprometendo a qualidade da água e dificultando seu tratamento por métodos convencionais (Pizato et al., 2017).

A presença de corantes nos efluentes industriais tem efeitos ambientais severos, como a alteração da transparência da água, prejudicando a penetração da luz solar e, consequentemente, a fotossíntese de organismos aquáticos (Peternel, Koprivanac, Kušić, 2006, Moreira, 2019, Silva, Laurindo, 2024). Estudos indicam que cerca de 4% da produção de corantes é perdida no meio aquático durante a síntese e aplicação (Coughlin, Kinkle & Bishop et al., 2003), contribuindo para a poluição hídrica e exigindo soluções eficazes para sua remoção.

Diante desse cenário, a busca por métodos eficientes de tratamento se torna essencial para mitigar os impactos ambientais causados por esses poluentes. Os tratamentos convencionais de efluentes incluem métodos físico-químicos e biológicos, como lodos ativados e filtros biológicos. No entanto, essas abordagens ainda apresentam limitações, pois os corantes possuem estruturas químicas resistentes à degradação natural, como luz e ozônio (Gul, 2018).

Como alternativa, métodos mais avançados vêm sendo estudados, como os Processos Oxidativos Avançados (POAs), que apresentam alto potencial na degradação de poluentes recalcitrantes (Kanakaraju, Glass & Oelgemöller, 2018). Outra opção promissora, de menor custo energético, é a filtração por membranas, que possui elevada eficiência na separação de contaminantes sem necessidade de aditivos químicos (Henriques, 2019; Rani e Kumar, 2021; Marques et al., 2025).

As membranas cerâmicas se destacam por sua alta resistência química e térmica, garantindo maior durabilidade operacional (Rani e Kumar, 2022). Embora a produção de membranas poliméricas seja mais acessível, as cerâmicas vêm ganhando espaço devido à sua superioridade em ciclos de aplicação e limpeza (Vicente, 2022).

A crescente preocupação com a contaminação hídrica causada pelo descarte inadequado de efluentes industriais ressalta a necessidade de soluções eficazes para o tratamento dessas águas. Diante desse cenário, este estudo propõe o desenvolvimento de membranas cerâmicas de baixo custo, incorporando pó de serragem de madeira como agente porogênico, visando a remoção de corantes de efluentes sintéticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho utilizou-se como matéria-prima argila chocobofe, caulim e serragem da madeira.

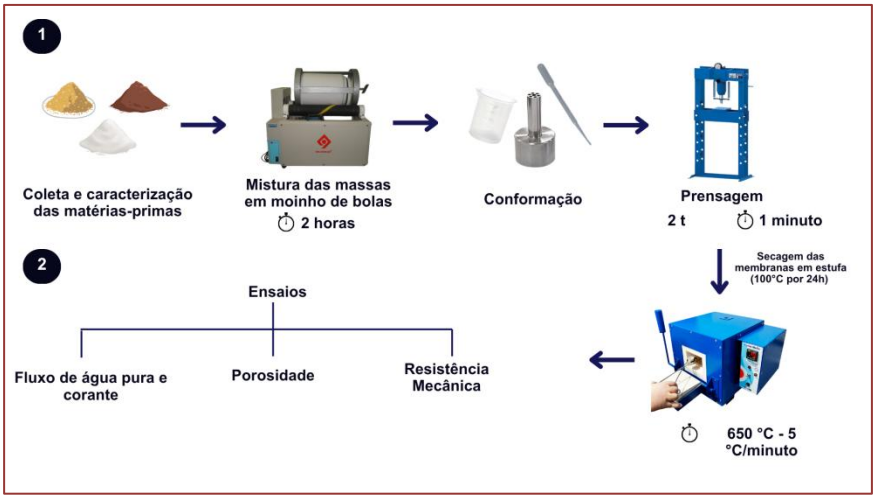
A argila foi fornecida pela empresa DOLOMIL Industrial Ltda (Boa Vista, PB). O caulim é proveniente da região de Caiçara, no Estado do Rio Grande do Norte. Por fim, a serragem da madeira foi coletada no município de Campina Grande, PB.

Os materiais foram secos em estufa à 100 ºC por 24 horas, visando a diminuição da umidade. Em seguida, foram desagregados e peneirados em peneira ABNT n° 100.

2.1. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a execução experimental da pesquisa está descrita resumidamente na Figura 01.

Figura 01. Etapas de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autoria própria (2026).

2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A caracterização foi realizada por meio da técnica de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro XRD 6000 Shimadzu, com radiação CuKα (40 kV/30 mA), velocidade do goniômetro de 2º/min e incremento de 0,02º, abrangendo uma faixa de varredura de 5º a 60º.

2.3. PREPARO DAS MEMBRANAS CERÂMICAS

As membranas foram preparadas variando a composição das matérias-primas, conforme pode ser visualizado na Tabela 01.

Tabela 01. Proporção (%) de matéria-prima na composição das massas cerâmicas utilizadas.

Formulações	Argila (%)	Caulim (%)	Agente porogênico (%)
WS0	95,0	5,0	0,0
WS1	92,5	5,0	2,5
WS2	90,0	5,0	5,0
WS3	85,0	5,0	10,0

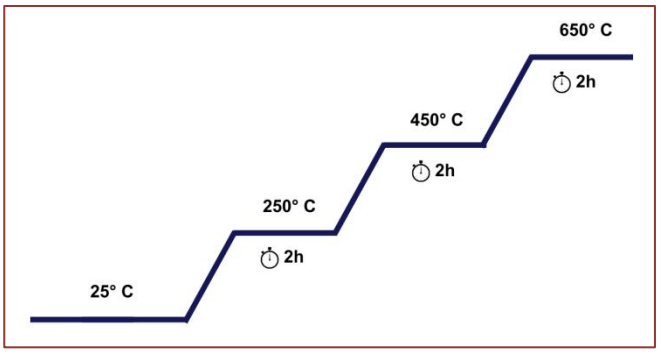
Fonte: Autoria própria (2026).

Após isso, foi efetuada a uniformização, utilizando moinho de bolas (Quimis/Q298-2), operando em alta rotação por um período de 2 horas.

Para a obtenção da membrana cerâmica, uma amostra de 3,5 g da massa foi inserida em um molde de aço inoxidável e compactada sob pressão hidráulica de 2 toneladas por 1 minuto, originando um disco cerâmico.

Após a prensagem, os discos foram submetidos a uma secagem em estufa a 100 °C por um período de 24 horas, com o objetivo de eliminar a umidade residual. Posteriormente, as amostras foram sinterizadas em mufla (Quimis, Q318M) a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min por duas horas nas temperaturas de 250 °C, 450 °C e 650 °C. A Figura 02 descreve o processo de sinterização.

Figura 02. Processo de sinterização das membranas cerâmicas.



Fonte: Autoria própria (2026).

Após o processo de sinterização, obteve-se as membranas cerâmicas.

2.4. CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DAS MEMBRANAS CERÂMICAS

Difração de raios-X (DRX) - Os padrões de difração do pó foram medidos em um equipamento da Shimadzu DRX 6000, com radiação de cobre Kα a 40 kV/30 mA, velocidade do goniômetro de 2 º/min com um passo de 0,02º sobre 2 faixa de 5° a 50°.

Porosidade - A medição da porosidade aparente foi realizada por meio do método de imersão, fundamentado no princípio de Arquimedes, utilizando água como meio líquido, conforme a norma ASTM C 20 (2000). O procedimento contou com o auxílio de uma balança analítica para obtenção dos dados necessários. O teste foi conduzido em três amostras de cada formulação para garantir a reprodutibilidade dos resultados. Com a determinação das massas seca, imersa e saturada dos corpos cerâmicos, a porosidade aparente pôde ser calculada por meio da Equação 1.

$$PA = \left(\frac{M_u - M_s}{M_u - M_i}\right) \times 100 \qquad (1)$$

onde:

Mu – massa úmida (g);

Ms – massa seca (g);

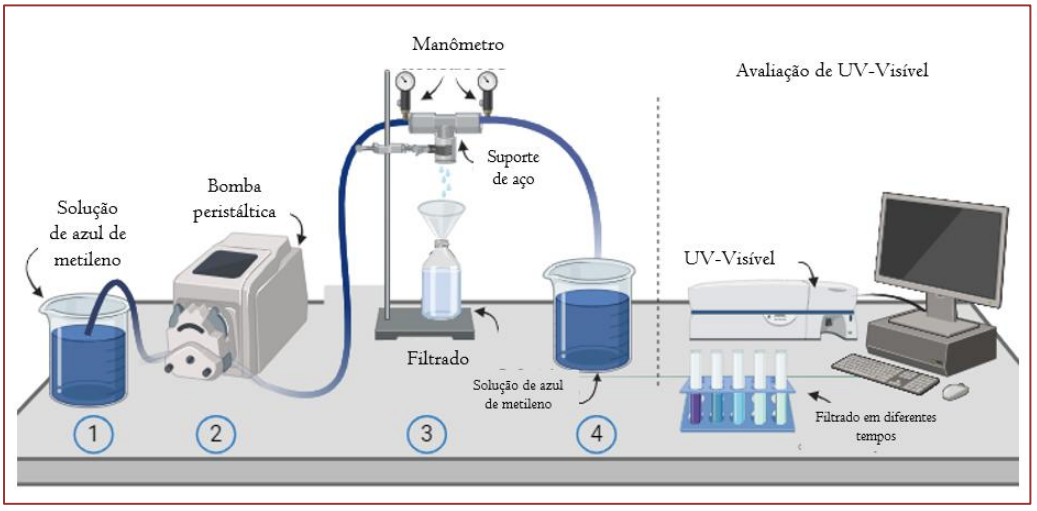
Mi – massa imersa (g).

Resistência Mecânica - A resistência mecânica das amostras foi determinada por meio do ensaio de compressão, conforme a norma ASTM C773. As amostras cerâmicas, previamente secas a 100 °C por 24 horas, foram submetidas a um teste de compressão uniaxial utilizando uma máquina universal (Shimadzu-Autgraph AGX-10 KN). Com intuito de determinar a capacidade de resistência da membrana em suportar pressão.

Avalição das membranas cerâmicas - A eficiência das membranas cerâmicas no transporte do permeado foi investigada em um sistema de separação contínuo, operando em escala laboratorial. Para os testes, utilizou-se o corante Azul de Metileno, a partir do qual foi preparada uma solução concentrada de 1000 $mg.L^{-1}$, denominada solução mãe. A absorbância dessa solução foi determinada por espectrofotometria para a construção da curva de calibração. Posteriormente, a solução mãe foi diluída até atingir a concentração desejada de 100 $mg.L^{-1}$.

O sistema de separação por membrana era composto por um módulo de aço inoxidável, uma bomba peristáltica Cole Parmer responsável pela alimentação, dois manômetros, um tanque de alimentação (béquer de 500 mL), além de reservatórios para o permeado e o rejeito (Erlenmeyers de 125 mL cada), conforme ilustrado na Figura 03. Durante os ensaios, as condições operacionais foram mantidas a 25°C e 2 bar de pressão.

Figura 03. Sistema de permeação/separação que será utilizado para avaliação da permeabilidade e seletividade das membranas cerâmicas de baixo custo.



Fonte: (Marques *et al.*, 2025).

O líquido filtrado pela membrana foi coletado em diferentes tempos e armazenado para posterior análise da concentração. Dessa forma, a quantificação do corante remanescente foi realizada utilizando um espectrofotômetro de absorção no espectro visível. Com esses dados, a eficiência de remoção do corante foi determinada por meio do cálculo da porcentagem de remoção (R%), conforme estabelecido na Equação 2.

$$\%Rem = \left(\frac{C_0 - C}{C_0}\right) \times 100 \qquad (2)$$

onde: %Rem representa o percentual de remoção, C_0 é a concentração inicial ($mg \cdot L^{-1}$) e C é a concentração final ($mg \cdot L^{-1}$).

O fluxo de permeado da membrana foi calculado utilizando a Equação 3.

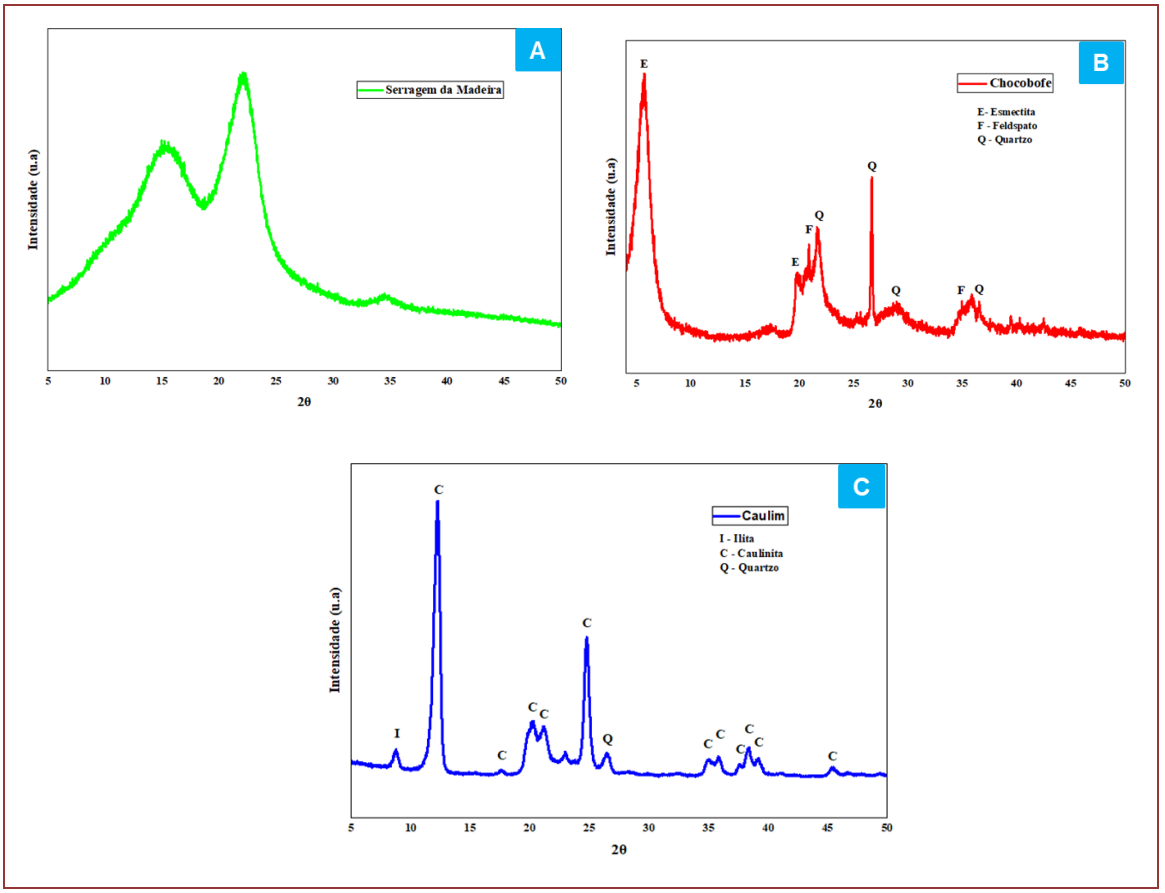
$$J = \frac{V}{A \times \Delta t} \qquad (3)$$

em que: J: Fluxo de água ($m^3.m^{-2}.h^{-1}$); V: Volume do permeado (m^3); A: Área da membrana (m^2); Δt: Tempo de permeação (h).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 04 está apresentado os difratogramas de raios X das matérias-primas utilizadas neste trabalho.

Figura 04. Difratograma de raios X das matérias primas (A), Serragem de Madeira (B), Caulim (C), Chocobofe.



Fonte: Autoria própria (2026).

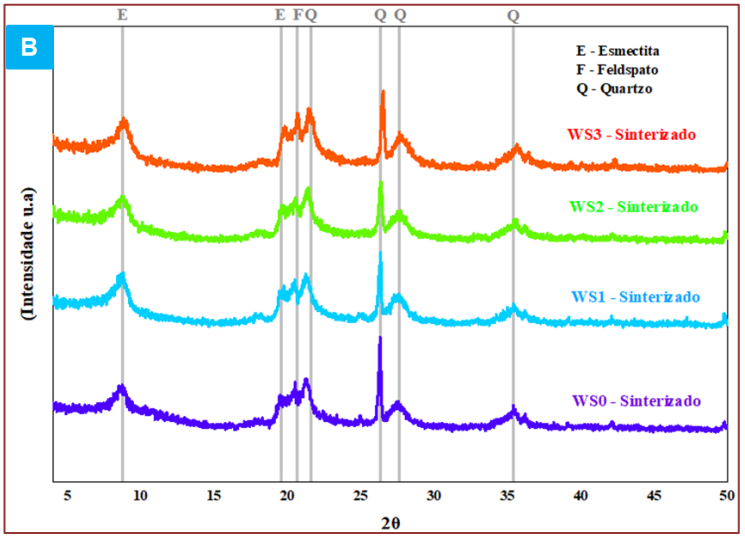
Com base no difratograma de raios X da Figura 04 (A), para a serragem da madeira são apresentados picos de difração característicos em $2\theta = 16°$ *e* 22,8°, tais picos são semelhantes aos encontrados por (Wu, Chen, Shao, Yue, Sue, Zhang & Qiu, 2025). Desse modo, os picos identificados tem relação com a estrutura cristalina da celulose da madeira formada naturalmente que podem ser identificados em outros trabalhos como (Lin, 2015).

Analisando a Figura 04 (B) para o caulin, é possível observar a presença majoritariamente do argilo mineral caulinita (C), que representa os picos mais repetidos na análise, aparecendo com seus maiores traços (picos) em $2\theta = 12{,}4°, 20{,}4°, 24{,}96°, 38{,}5°$. Tais resultados, comprovam outros trabalhos como de (Medeiros, Neto, Ferreira, 2020) que apresentam também picos característicos da caulinita em diferentes tipos de amostras. Além do argilomineral caulinita, também foram notados picos menos intensos de ilita (I) apresentados em $2\theta = 8{,}94°$ e quartzo (Q) $2\theta = 26{,}66°$.

Nesse contexto, a Figura 04 (C) apresenta os resultados obtidos para o último componente das membranas desenvolvidas pelo trabalho, a argila chocobofe, que apresentou o seu pico mais intenso de esmectita (E) em $2\theta = 5{,}6°$, além deste a análise também apontou picos de quartzo (Q)com suas maiores intensidades em $2\theta = 21{,}7°$ e 26,7° sendo este e a esmectita picos e argilominerais característicos de argilas esmectitas (Souza Santos, 1992). A análise também permitiu a identificação de feldspato (F) em $2\theta = 20{,}8°$ e 35° que pode ser observada também outros trabalhos como (Hurle, 2022).

Na Figura 05 observa-se os difratograma de raios x das membranas.

Figura 05. Difratograma de Raios X das membranas cerâmicas.



Fonte: Autoria própria (2026).

Os difratogramas das membranas cerâmicas após a sinterização (Figura 05) evidenciaram a presença predominante de esmectita e quartzo, além de picos associados ao feldspato, fases características das matérias-primas utilizadas. Comparando-se os resultados antes e após a sinterização, observou-se redução na intensidade dos picos de esmectita, indicando modificações estruturais provocadas pelo tratamento térmico. Além disso, a ausência dos picos característicos da caulinita sugere sua transformação em metacaulim

por meio do processo de desidroxilação, enquanto o quartzo permaneceu como uma das principais fases cristalinas presentes nas membranas.

Comportamento semelhante foi observado para todas as formulações, uma vez que foram produzidas a partir das mesmas matérias-primas, diferindo apenas pela adição de serragem de madeira nas formulações WS1, WS2 e WS3. A serragem atua como agente porogênico e, durante a queima, sofre decomposição térmica, promovendo a formação de poros na estrutura cerâmica. Essas transformações mineralógicas e estruturais decorrentes da sinterização influenciam diretamente as propriedades das membranas, como porosidade e desempenho em processos de separação.

A Tabela 02 apresenta os resultados de porosidade aparente e resistência mecânica das membranas cerâmicas.

Tabela 02. Propriedades das membranas cerâmicas de baixo custo.

Membranas	Porosidade (%)	Resistência Mecânica (MPa)
WS0	33,66	28,94
WS1	28,35	20,66
WS2	38,62	17,04
WS3	39,55	12,81

Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados obtidos evidenciam que as diferentes formulações exerceram influência significativa sobre a porosidade e a resistência mecânica das membranas. A membrana WS0 apresentou porosidade de 33,66% e a maior resistência mecânica entre as amostras analisadas (28,94 MPa), indicando uma estrutura com boa integridade mecânica. Com a modificação da formulação (adição do agente porogênico), observam-se alterações notórias nessas propriedades, sugerindo mudanças na organização da matriz cerâmica e na distribuição dos poros.

Em linhas gerais, verifica-se uma tendência de redução da resistência mecânica com o aumento da porosidade. As membranas WS2 e WS3 apresentaram os maiores valores de porosidade (38,62% e 39,55%, respectivamente), acompanhados das menores resistências mecânicas (17,04 MPa e 12,81 MPa). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que uma estrutura mais porosa contém uma menor fração de material sólido capaz de suportar esforços mecânicos.

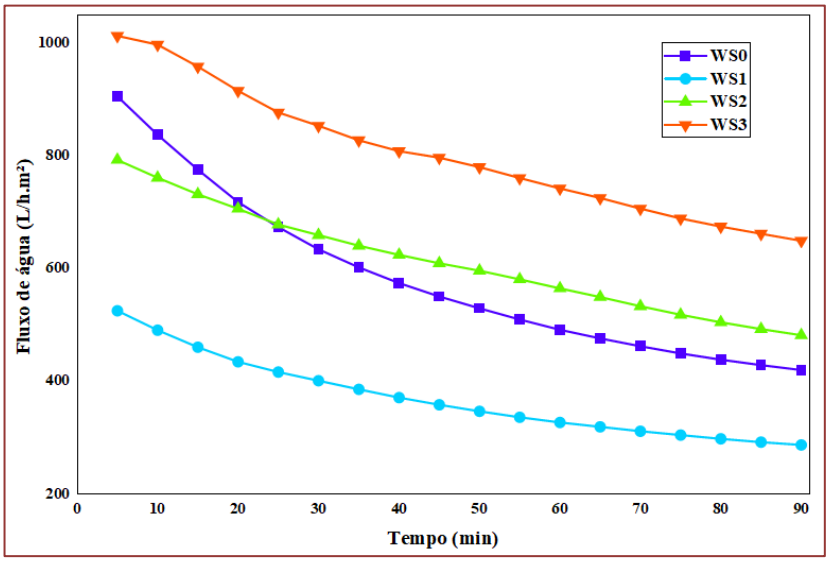
A membrana WS3 apresentou simultaneamente a maior porosidade e a menor resistência mecânica, reforçando a relação inversa entre essas propriedades. Esse resultado mostra que o aumento da quantidade de poros compromete a estrutura da membrana, tornando-a mais frágil. Em aplicações que exigem alta permeabilidade ou fluxo de massa, uma maior porosidade pode ser vantajosa; entretanto, essa característica geralmente ocorre em detrimento da resistência mecânica.

Em contrapartida, a membrana WS1 apresentou o menor valor de porosidade (28,35%), mas sua resistência mecânica (20,66 MPa) permaneceu inferior à da membrana WS0. Esse resultado indica que a resistência mecânica não depende exclusivamente da porosidade total. Fatores como tamanho e distribuição dos poros, interação entre os componentes da formulação, homogeneidade da matriz e possíveis defeitos estruturais também podem influenciar significativamente o comportamento mecânico do material. Dessa forma, uma redução na porosidade não garante necessariamente um aumento da resistência.

Em comparação com o estudo de Marques *et al.* (2025), que avaliou formulações semelhantes sob menores pressões de compactação, as membranas produzidas neste trabalho apresentaram valores superiores de resistência mecânica. Esse resultado evidencia a influência positiva do aumento da pressão de compactação na melhoria das propriedades mecânicas, possivelmente devido à maior densificação da estrutura e à redução de defeitos internos, favorecendo uma melhor distribuição dos esforços mecânicos ao longo do material.

A Figura 06 mostra o fluxo de água pura das membranas cerâmicas desenvolvidas nesse trabalho ao longo de 90 minutos.

Figura 06. Fluxo de água pura das membranas cerâmicas.



Fonte: Autoria própria (2026).

Como observado na Figura 06, a membrana WS1 apresentou o menor fluxo médio de água, com aproximadamente 367,8 L/h·m^2, enquanto a membrana WS3 apresentou o maior fluxo médio, com cerca de 800,1 L/h·m^2. As membranas WS0 e WS2 apresentaram fluxos médios de aproximadamente 581,0 L/h·m^2 e 613,8 L/h·m^2, respectivamente.

Todas as formulações apresentaram comportamento decrescente do fluxo de água ao longo do tempo, indicando uma redução da permeabilidade das membranas durante a operação. Esse comportamento pode estar associado ao bloqueio gradual dos poros e ao acúmulo de material na superfície filtrante, fenômenos que dificultam a passagem da água através da estrutura cerâmica.

Ao analisar os valores médios de fluxo de água, verifica-se que a membrana WS3 apresentou o maior desempenho entre as formulações estudadas, seguida por WS2, WS0 e WS1. Essa tendência acompanha os resultados de porosidade, indicando uma relação direta entre a quantidade de poros presentes na estrutura e a capacidade de transporte de água através da membrana. O elevado fluxo observado para a membrana WS3 pode ser atribuído à sua maior porosidade, que favorece a formação de caminhos preferenciais para a passagem do fluido, resultando em maior permeabilidade hidráulica ao longo do ensaio.

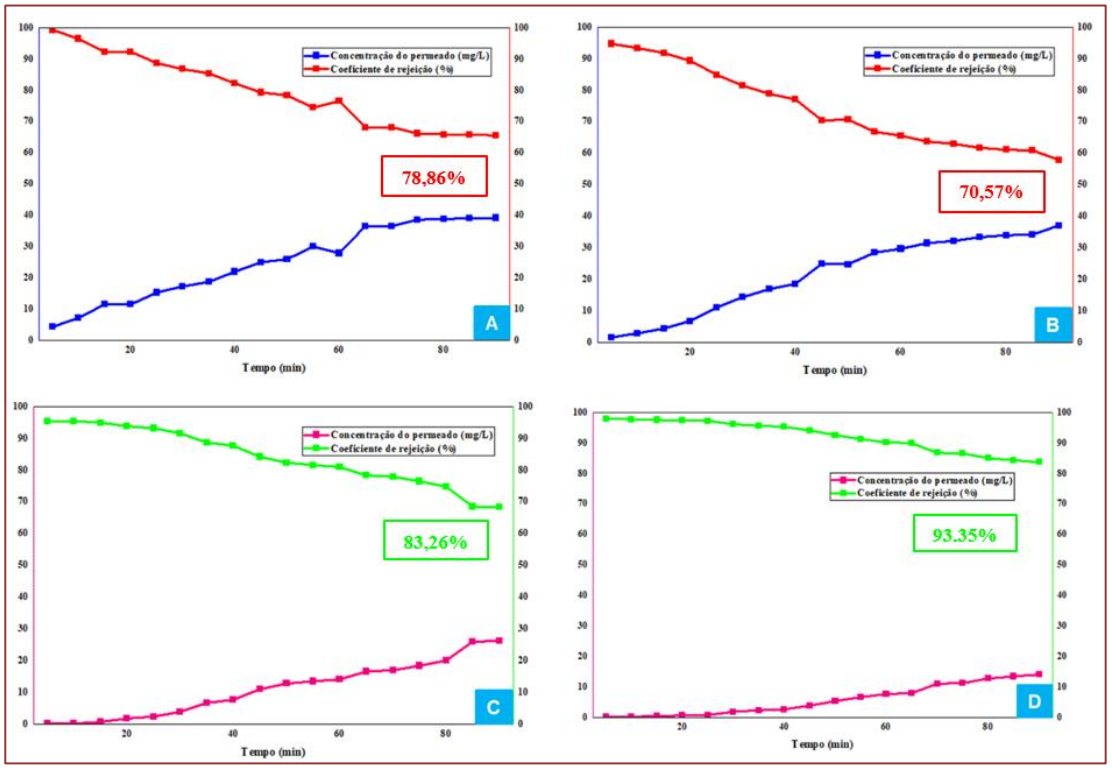
Comparando os resultados deste trabalho com os obtidos por Marques *et al.* (2025), observa-se que as membranas desenvolvidas apresentaram desempenho semelhante e, em alguns casos, superior ao reportado pelos autores. As membranas WS0, WS2 e WS3 apresentaram fluxos médios de água superiores aos observados para as membranas M0, M2 e M3, respectivamente, enquanto a membrana WS1 apresentou valor próximo ao obtido para a membrana M1.

Esses resultados indicam que as condições de processamento empregadas neste trabalho foram adequadas para a obtenção de membranas com elevada permeabilidade hidráulica. Além disso, o aumento do fluxo observado para as formulações com maiores teores de agente formador de poros evidencia a influência da serragem na formação da estrutura porosa da matriz cerâmica, favorecendo a passagem de água através da membrana.

As diferenças observadas entre os estudos podem estar relacionadas às particularidades do processo de fabricação, incluindo as condições de prensagem, secagem e sinterização. Tais parâmetros influenciam diretamente a formação, o tamanho e a interconectividade dos poros, refletindo nas propriedades de permeabilidade das membranas. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que as membranas desenvolvidas apresentam potencial para aplicação em processos de filtração, especialmente as formulações WS2 e WS3, que apresentaram os maiores fluxos médios de água.

A Figura 07 apresenta a eficiência de remoção e a concentração do permeado em 90 minutos de experimento para as membranas WS0, WS1, WS2 e WS3.

Figura 07. Concentração do permeado e do coeficiente de rejeição das membranas cerâmicas.



Fonte: Autoria própria (2026).

Analisando os gráficos da Figura 07, a concentração de corante no permeado aumentou gradualmente ao longo do tempo para todas as formulações, comportamento associado à saturação progressiva dos sítios de retenção e ao aumento da passagem de moléculas de corante através da estrutura porosa das membranas. Consequentemente, verificou-se uma redução gradual do coeficiente de rejeição durante o período de filtração.

Os coeficientes médios de rejeição obtidos foram de 78,86%, 70,57%, 83,26% e 93,35% para as membranas WS0, WS1, WS2 e WS3, respectivamente. Dentre as formulações avaliadas, a membrana WS3 apresentou o melhor desempenho na remoção do azul de metileno, seguida pelas membranas WS2, WS0 e WS1. Esse comportamento sugere que a composição utilizada na membrana WS3 favoreceu características estruturais capazes de promover maior retenção do corante, resultando em uma menor concentração de contaminante no permeado.

Comparando os resultados deste trabalho com aqueles reportados por Marques *et al.*, (2025), observa-se que a membrana WS3 apresentou desempenho próximo ao das membranas M1 e M3 do estudo de referência, que obtiveram coeficientes médios de rejeição de 96,9% e 96,7%, respectivamente. Entretanto, o valor obtido ainda permanece inferior ao desempenho máximo reportado pelos autores para a membrana M2, cuja rejeição média foi de 99,2%.

As diferenças observadas entre os estudos podem estar relacionadas às condições de processamento adotadas na fabricação das membranas, incluindo composição da massa cerâmica, teor de agente formador de poros, pressão de compactação e condições de sinterização. Tais parâmetros influenciam diretamente a distribuição, o tamanho e a interconectividade dos poros, afetando simultaneamente o fluxo permeado e a eficiência de retenção do corante. Apesar dessas diferenças, os resultados demonstram que as membranas desenvolvidas apresentam potencial para aplicação em processos de tratamento de efluentes contendo azul de metileno, especialmente a formulação WS3, que apresentou a maior eficiência de remoção entre as membranas avaliadas.

4. CONCLUSÃO

Por fim, conclui-se que a adição da serragem de madeira como agente porôgenico influenciou positivamente o desempenho das membranas cerâmicas, considerando apenas as membranas com serragem da madeira (WS1 a WS30, promovendo o aumento do fluxo de água e da eficiência de remoção do azul de metileno.

A membrana WS3 apresentou os melhores resultados, alcançando o maior fluxo permeado e o maior coeficiente de rejeição (93,35%).

Dessa forma, as membranas produzidas demonstraram potencial para aplicação no tratamento de efluentes contendo corantes, destacando-se a formulação WS3 como a mais promissora entre as avaliadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial (PET) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), financiado pelo Ministério da Educação (MEC). João Victor Silva Sousa agradece ao PET Engenharia Química da UFCG pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

[1] COUGHLIN, M. F.; KINKLE, B. K.; BISHOP, P. L. High performance degradation of azo dye Acid Orange 7 and sulfanilic acid in a laboratory scale reactor after seeding with cultured bacterial strains. **Water Research**, v. 37, n. 11, p. 2757-2763, 2003. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00585-4.

[2] GUL, U. D. Bioremediation of dyes in textile wastewater. **Turkish Journal of Scientific Reviews**, p. 24-28, 2018.

[3] HENRIQUES, J. D. O.; PEDRASSANI, M. W.; KLITZKE, W.; OLIVEIRA, T. V.; VIEIRA, P. A.; MARIANO, A. B.; VIEIRA, R. B. Fabrication and characterization of low-cost ceramic membranes for microfiltration of Acutodesmus obliquus using modified clays. **Revista Materia**, v. 24, 2019.

[4] HURLE, K.; LUBAUER, J.; BELLI, R.; LOHBAUER, U. On the assignment of quartz-like $LiAlSi_2O_6$-SiO_2 solid solutions in dental lithium silicate glass-ceramics: Virgilite, high quartz, low quartz or stuffed quartz derivatives? **Dental Materials**, v. 38, p. 1558–1563, 2022. DOI: 10.1016/j.dental.2022.08.008.

[5] KANAKARAJU, D.; GLASS, B. D.; OELGEMÖLLER, M. Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: **A review**. 2018.''

[6] LIN, J. H.; HUANG, C. L.; LIN, Z. I.; LOU, C. W. Far-infrared emissive polypropylene/wood flour wood plastic composites: Manufacturing technique and property evaluations. **Journal of Composite Materials**, v. 0, p. 1–11, 2015.

[7] MARQUES, A. V. S.; BARBOSA, A. S.; MAIA, L. F.; RODRIGUES, M. G. F.; BARBOSA, T. L. A.; LUNA, C. B. B. Development and Characterization of Sawdust-Based Ceramic Membranes for Textile Effluent Treatment. **Membranes**,v. 15, n. 10, p. 298, 2025.

[8] MEDEIROS, A. R. S.; NETO, S. R. F.; FERREIRA, D. Análise granulométrica e DRX para caracterização do rejeito de caulim da região do Seridó da Paraíba visando uma nova rota de beneficiamento. **Brazilian Journal of Development**, 2020.

[9] MOREIRA, S. C. Aspectos ecotoxicológicos do corante índigo sintético e natural – com organismos teste Danio rerio e Raphidocelis subcapitata. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Sorocaba, 2019.

[10] PETERNEL, I.; KOPRIVANAC, N.; KUŠIĆ, H. UV-based processes for reactive azo dye mineralization. **Water Research**, v. 40, n. 3, p. 525-532, 2006. DOI: 10.1016/j.watres.2005.11.042.

[11] PIZATO, E.; LOPES, A. C.; ROCHA, R. D. C.; BARBOSA, A. M.; CUNHA, M. A. A. Caracterização de efluente têxtil e avaliação da capacidade de remoção de cor utilizando o fungo Lasiodiplodia theobromae MMP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, 2017.

[12] RANI, S. L. S.; KUMAR, R. V. Insights on applications of low-cost ceramic membranes in wastewater treatment: A mini-review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2021.

[13] RANI, S. L. S.; KUMAR, R. V. Fabrication and characterization of ceramic membranes derived from inexpensive raw material fuller's earth clay. **Materials Science & Engineering B**, 2022.

[14] SILVA, I. R.; LAURINDO, E. A. Study of the application of electrocoagulation to remove indigo blue dye from textile industry effluent. **Revista DAE,** São Paulo, v. 72, n. 247, p. 01-13, 2025.

[15] SILVA, M. Indústria têxtil: consumo de água e impacto ambiental desafiam setor. **Revista Ambiental**, 08 nov. 2024.

[16] SOUZA SANTOS, P. Ciência e Tecnologia de Argilas. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: **Editora Edgard Blücher**, 1992. 3 v.

[17] VICENTE, R. Preparation and characterization of mixed matrix polymeric membranes from SAN and organophilic clay. 2022.

[18] WU, H.; CHEN, H.; SHAON, X.; YUE, X.; SUN, J.; ZHANG, T.; QIU, F. All-wood-based hybrid membrane derived from waste sawdust for efficient emulsion separation. **Food and Bioproducts Processing**, 2025.

Capítulo 11

Aplicação de ferritas suportadas em biochar em processos oxidativos avançados: uma mini revisão

Jandira Leichtweis
Letícia Camargo Fabris
Taiane da Silva Guedes
Ana Carolina Ferreira Piazzi Fuhr
Elvis Carissimi
Luis Guillermo Ramírez Mérida
Salatiel Wohlmuth da Silva

Resumo: O aumento da contaminação de águas residuais por poluentes orgânicos persistentes tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e eficientes para o tratamento desses efluentes. Nesse contexto, os processos oxidativos avançados (POAs), especialmente o processo foto-Fenton heterogêneo, destacam-se pela elevada capacidade de degradação de contaminantes recalcitrantes por meio da geração de espécies reativas oxidantes. Entre os materiais utilizados como fotocatalisadores, as ferritas do tipo espinélio (MFe_2O_4) vêm recebendo grande atenção devido às suas propriedades magnéticas, estabilidade química e ativação sob luz visível. Entretanto, limitações associadas à recombinação dos pares elétron/lacuna e à aglomeração das partículas motivaram o desenvolvimento de materiais compósitos suportados. Nesse cenário, o biochar produzido a partir de resíduos de biomassa surge como um suporte promissor por apresentar elevada área superficial, boa condutividade elétrica, estrutura porosa e abundância de grupos funcionais superficiais, características que favorecem a adsorção de poluentes, a separação de cargas fotogeradas e a redução do *band gap* dos materiais suportados. Além disso, a utilização de resíduos agroindustriais para a produção de biochar está alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular, agregando valor a resíduos e contribuindo para a mitigação ambiental. Esta mini revisão aborda os principais avanços relacionados à aplicação de ferritas suportadas em biochar em POAs para o tratamento de águas residuais contendo poluentes de difícil degradação, destacando os mecanismos fotocatalíticos, as propriedades dos compósitos e os recentes estudos reportados na literatura.

Palavras-chave: MFe_2O_4; biochar; compósitos fotocatalíticos.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável baseia-se no equilíbrio entre os pilares ambiental, social e econômico, tornando-se cada vez mais relevante diante do aumento das pressões ambientais, como poluição, mudanças climáticas, degradação dos ecossistemas e perda de biodiversidade (Bueloth et al., 2026; Mekha et al., 2024). Entre os principais problemas ambientais destaca-se a contaminação de águas residuais por poluentes de difícil degradação (como fármacos, corantes, pesticidas), frequentemente detectados em solos e corpos hídricos em concentrações acima dos limites regulatórios (Alsufyani et al., 2026; Cen et al., 2026). Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, eficientes e economicamente viáveis para a degradação desses contaminantes em águas residuais.

Os processos oxidativos avançados (POAs) têm sido amplamente investigados no tratamento de águas residuais contendo contaminantes orgânicos recalcitrantes, especialmente corantes, devido à elevada eficiência na degradação de compostos resistentes aos tratamentos convencionais (Ledakowicz and Pázdzior, 2021). Esses processos baseiam-se, principalmente, na geração de espécies reativas, como os radicais hidroxila (•OH), que são capazes de promover a mineralização parcial ou total de diversos poluentes orgânicos. Entre as principais vantagens dos POAs destacam-se a elevada capacidade oxidativa, a melhoria da qualidade do efluente tratado e a possibilidade de aplicação em diferentes matrizes aquosas (Pinoargote-chang et al., 2022; Krishnan et al., 2017).

Dentre os diferentes POAs, o processo foto-Fenton heterogêneo tem recebido atenção significativa devido à sua elevada eficiência e potencial aplicação utilizando radiação visível ou solar. Esse processo envolve a ativação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) na presença de catalisadores à base de ferro, promovendo a geração contínua de radicais oxidantes por meio do ciclo redox Fe^{3+}/Fe^{2+} (Borba et al., 2019; Oliveira et al., 2019). Em comparação ao processo Fenton homogêneo, o sistema heterogêneo apresenta vantagens importantes, como menor geração de lodo férrico, maior estabilidade catalítica e possibilidade de recuperação e reutilização do material catalítico (Yan et al., 2023). Nesse contexto, o desenvolvimento de fotocatalisadores eficientes, estáveis e de baixo custo torna-se fundamental para ampliar a aplicação dos POAs em sistemas reais de tratamento de águas residuais.

Entre os materiais mais estudados para aplicação em POAs destacam-se as ferritas (MFe_2O_4 como: $NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, $CuFe_2O_4$ e $MgFe_2O_4$), devido às suas propriedades magnéticas, estabilidade química, baixa toxicidade e reduzida energia de *band gap*, características que favorecem sua ativação sob radiação visível (Welter et al., 2022; Leichtweis et al., 2021). Entretanto, o uso isolado desses óxidos pode apresentar limitações relacionadas à recombinação dos pares elétron/lacuna (e^-/h^+), redução da eficiência fotocatalítica e dificuldades associadas à dispersão do material em meio aquoso (Yan et al., 2023; Shi et al., 2022).

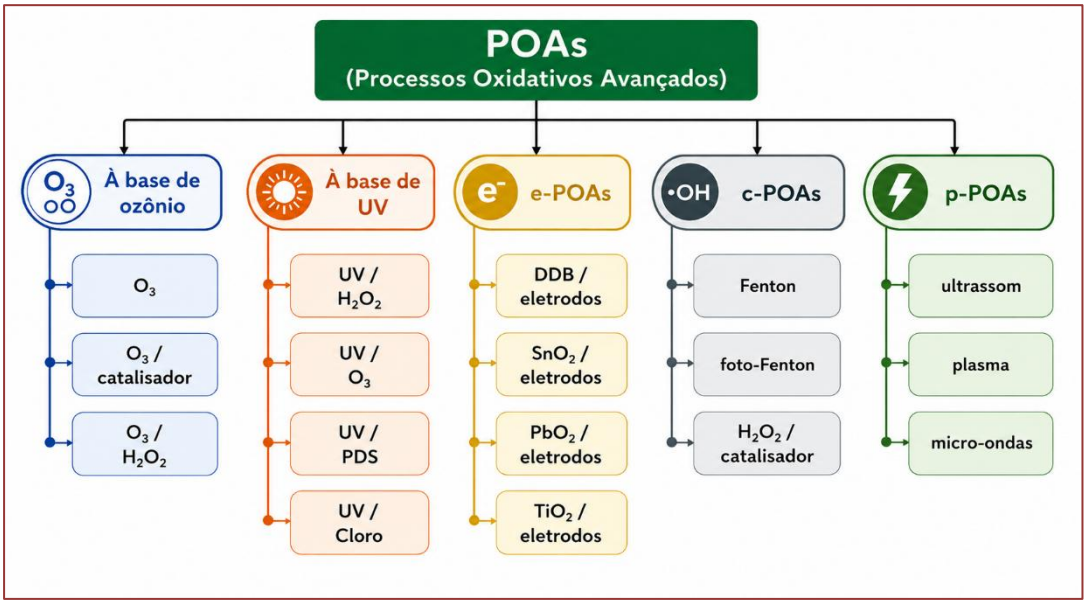
Com o objetivo de superar essas limitações, diferentes estudos vêm investigando o suporte de ferritas em matrizes carbonáceas, especialmente biochar, visando melhorar a separação das cargas fotogeradas, aumentar a área superficial, reduzir a recombinação eletrônica e favorecer a adsorção dos contaminantes (Abbaci et al., 2022; Welter et al., 2022; Leichtweis; Silvestri; Carissimi, 2020). O biochar é um material carbonáceo obtido a partir da pirólise de biomassas em atmosfera com baixa disponibilidade de oxigênio, apresentando elevada porosidade, grupos funcionais superficiais e baixo custo de

obtenção (Welter et al., 2022; Tabassam et al., 2022). Além disso, a utilização de resíduos agroindustriais para sua produção agrega valor a materiais descartados e contribui para estratégias de economia circular e sustentabilidade ambiental. Dessa forma, a combinação entre ferritas e biochar tem se mostrado uma alternativa promissora para o desenvolvimento de materiais fotocatalíticos mais eficientes e sustentáveis aplicados aos POAs. Assim, esta mini revisão tem como objetivo discutir os principais avanços relacionados ao uso de ferritas suportadas em biochar em processos oxidativos avançados.

2. PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS

Nos últimos anos, os POAs têm se destacado como tecnologias eficientes para a degradação de poluentes tóxicos e biopersistentes presentes em águas residuais (Leichtweis et al., 2025; Welter et al., 2022; Sanabria et al., 2021). Esses processos são capazes de promover a mineralização dos contaminantes em compostos inorgânicos, como CO_2, água e sais minerais, ou convertê-los em moléculas orgânicas menores e mais biodegradáveis (Sanabria et al., 2022). A principal característica dos POAs é a geração de espécies reativas altamente oxidantes, especialmente os radicais •OH, capazes de oxidar praticamente qualquer composto orgânico devido ao seu elevado potencial redox e não seletividade (Leichtweis et al., 2023a; Welter et al., 2022; Thomas; Dionysiou; Pillai, 2021; Oller; Malato; Sánchez-pérez, 2011; Malato et al., 2009). Os diferentes tipos de POAs distinguem-se principalmente pelo mecanismo empregado na formação dessas espécies oxidantes. Entre os principais POAs destacam-se os processos baseados em ozônio (O_3), sistemas UV/H_2O_2, processos eletroquímicos (e-POAs), catalíticos (c-POAs), como as reações de Fenton e foto-Fenton heterogêneo, além dos processos físicos (p-POAs), como ultrassom, plasma e micro-ondas. A Figura 1 apresenta um resumo dos principais POAs reportados na literatura.

Figura 1 – Diferentes tipos de POAs.



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2022).

Alguns dos POAs mais investigados até o presente momento para a degradação de poluentes orgânicos em meio aquoso são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Estudos utilizando POAs em diferentes condições ambientais para tratamento de águas residuais contendo poluentes emergentes.

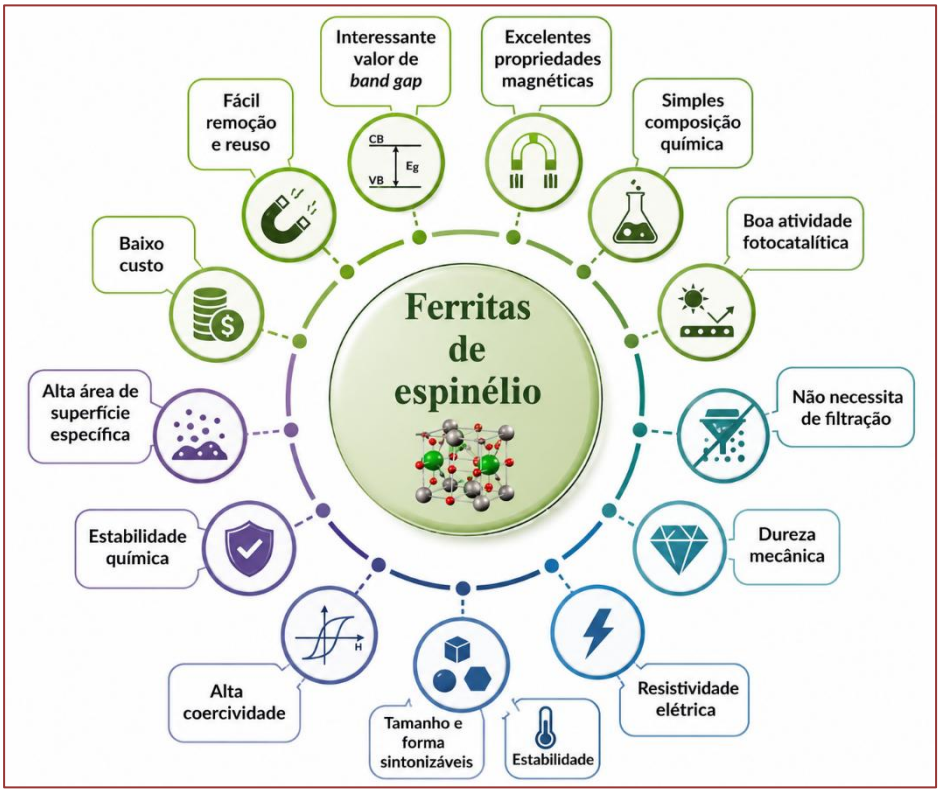
Tipo de POA/ Fonte de irradiação	Material	Massa ($g\ L^{-1}$)	pH	Eficiência (%)	Tempo (min)	Referência
Fotocatálise / UV	ZnO/biochar	1,00	7,00	100,00	67	(Leichtweis et al., 2020)
Fotocatálise / UV	**ZnO-CoOx-CeO_2**	1,00	6,00	98,87	65	(Lu et al., 2022)
Fotocatálise / visível	ZnO	0,50	7,00	88,00	90	(Shahzad et al., 2022)
Foto-Fenton/ visível	$Co_xFe_{1-x}N$-NCs	0,10	3,00	100,00	60	(Miao et al., 2022)
Foto-Fenton/ visível	$MnFe_2O_4$@CPB	0,25	3,00	99,50	150	(Wang et al., 2021)
Foto-Fenton/ visível	g-C_3N_4/rGO /$ZnFe_2O_4$	0,5	11,00	97,31	60	(Das et al., 2023)
Eletro-Fenton /-	Fe_7S_8/C-1-600	-	5,60	98,6	60	(Zhao et al., 2022)
Eletro-Fenton /-	ZnO/C	-	3,00	87,78	192	(Thor et al., 2021)
fotoeletro-Fenton / UV	Ânodo de aço sobre um cátodo de grafite	-	3,00	99,90	60	(Mansour et al., 2023)
fotoeletro-Fenton / UVA	Sulfato de Fe (II) hepta-hidratado	-	3,00	100	420	(Márquez et al., 2022)
Fenton /-	Fe_3O_4 suportado por hidrogel de alginato/PVA	0,10	7,00	92,00	15	(Zhang et al., 2022)
Fenton /-	$Fe@BC_{FAK}$	0,20	3,20	100,00	10	(Xia et al., 2022)
Fenton /-	Resíduos piríticos brutos	0,50	4,53	98,00	250	(Cechinel et al., 2022)
Foto-Fenton/ visível	$ZnFe_2O_4$/ biochar	1,00	3	100	60	(Leichtweis et al., 2023b)
Foto-Fenton/ solar	$ZnFe_2O_4$/ biochar	1,00	3	100	40	(Fabris et al., 2026)

3. FERRITAS

Entre os diferentes tipos de POAs apresentados na Figura 1, os processos oxidativos avançados catalíticos (c-POAs) destacam-se por necessitarem da utilização de catalisadores capazes de promover a geração de espécies reativas oxidantes, aumentando a eficiência de degradação dos contaminantes. Nesse contexto, o processo foto-Fenton heterogêneo (PFF) tem recebido atenção significativa devido ao uso de materiais fotocatalíticos à base de ferro. Entre os fotocatalisadores utilizados no PFF, as ferritas vêm sendo amplamente investigadas para a fotodecomposição de poluentes orgânicos e tóxicos em águas residuais (Welter et al., 2022; Leichtweis et al., 2021). As ferritas apresentam estrutura do tipo espinélio, com fórmula geral MFe_2O_4, em que M representa um íon metálico bivalente, como Cu, Co, Zn, Ni, Mg e Sn (Soufi et al., 2021; Sivakumar et

al., 2011). Além da elevada atividade fotocatalítica, esses materiais apresentam propriedades estruturais, elétricas e magnéticas que ampliam seu potencial de aplicação em diferentes áreas tecnológicas, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Diferentes características das ferritas de espinélio.



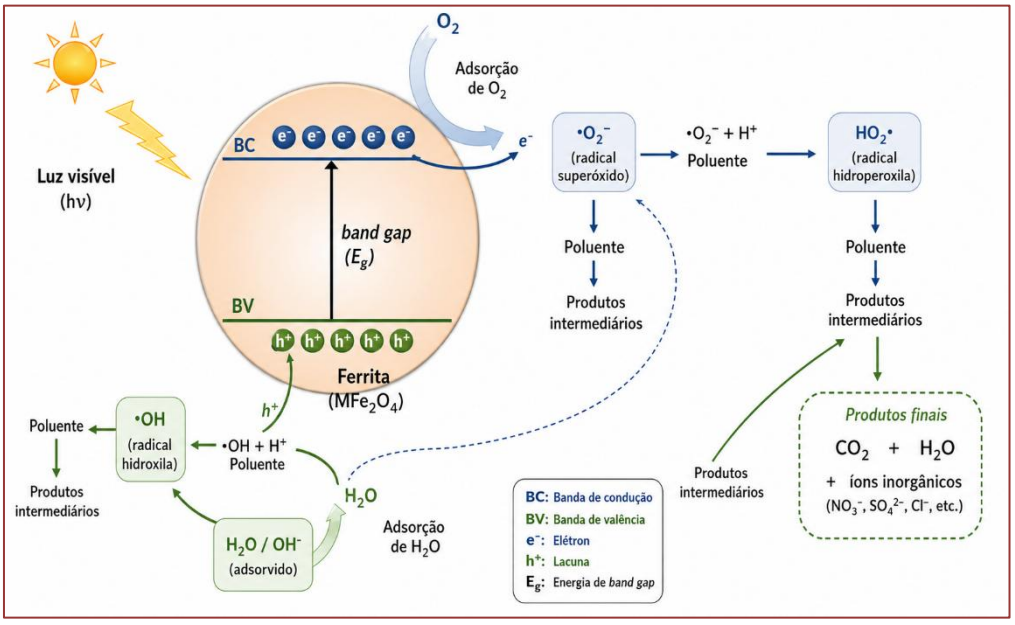
Fonte: Adaptado de Soufi et al. (2021).

As ferritas destacam-se como materiais promissores para aplicações fotocatalíticas devido à sua elevada atividade sob radiação visível, valores reduzidos de band gap e facilidade de recuperação magnética após o processo de tratamento. Em geral, esses materiais apresentam energia de *band gap* entre 1,2 e 2,9 eV, permitindo sua ativação na região do visível do espectro eletromagnético, característica importante para aplicações utilizando luz solar (Liandi et al., 2023; Tatarchuk et al., 2019). Além disso, as ferritas apresentam boa estabilidade química, elevada resistência mecânica e possibilidade de reutilização em múltiplos ciclos sem perdas significativas de desempenho fotocatalítico. Entre as ferritas mais investigadas destacam-se $NiFe_2O_4$, $CuFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$ e $MgFe_2O_4$, amplamente empregadas na fotodegradação de poluentes orgânicos em águas residuais devido às suas excelentes propriedades magnéticas, elevada eficiência fotocatalítica e reduzida recombinação dos pares elétron/lacuna sob radiação visível (Leichtweis et al., 2025; Silva; Soares; Fajardo, 2023; Shi et al., 2022a; Sun et al., 2022; Welter et al., 2022; Soufi et al., 2021; Sheikhpoor et al., 2021; Oliveira et al., 2018).

O mecanismo de fotocatálise das ferritas envolve diferentes etapas relacionadas à geração, separação e transferência de cargas. Inicialmente, quando a ferrita é irradiada com energia igual ou superior ao seu *band gap*, ocorre a fotoexcitação do material, promovendo a migração de elétrons da banda de valência (BV) para a banda de condução

(BC) e gerando pares elétron/lacuna (e^-/h^+). Os elétrons fotogerados presentes na BC atuam como agentes redutores, enquanto as lacunas presentes na BV apresentam elevado potencial oxidante. Essas espécies podem migrar para a superfície do fotocatalisador e reagir com moléculas adsorvidas, como oxigênio e água, promovendo a formação de espécies reativas oxidantes, principalmente radicais •OH e superóxido ($\bullet O_2^-$), responsáveis pela degradação dos poluentes orgânicos até produtos intermediários e, posteriormente, CO_2, H_2O e íons inorgânicos. A Figura 3 apresenta um mecanismo simplificado da fotoativação das ferritas (Srikanth et al., 2017; Shan; Ghazi; Rashid, 2010).

Figura 3 – Mecanismo simplificado da fotoativação das ferritas.



4. BIOCHAR

Embora as ferritas apresentem boa atividade fotocatalítica quando utilizadas na forma pura, sua aplicação prática ainda apresenta limitações relacionadas principalmente à aglomeração das partículas devido às propriedades magnéticas desses materiais e às elevadas taxas de recombinação dos pares e^-/h^+, fatores que reduzem a eficiência fotocatalítica e o rendimento quântico do processo (Leichtweis et al., 2025; Wang; Chen, 2022; Welter et al., 2022; Huang et al., 2021). Nesse contexto, o desenvolvimento de materiais compósitos tem se mostrado uma estratégia eficiente para superar essas limitações, uma vez que esses materiais combinam propriedades complementares de diferentes fases orgânicas e inorgânicas em uma única estrutura, resultando em desempenho superior em comparação aos materiais puros (Leichtweis et al., 2025; Hong; Chen, 2015). Além de favorecer a separação e transferência de cargas fotogeradas, os compósitos podem aumentar a estabilidade química, facilitar a recuperação magnética do fotocatalisador, melhorar o reuso e reduzir a energia de *band gap*, permitindo maior aproveitamento da radiação visível (Leichtweis et al., 2023a).

Entre os diferentes materiais utilizados como suporte para ferritas, o biochar destaca-se como uma alternativa altamente promissora devido ao seu baixo custo, elevada área superficial específica, estrutura porosa desenvolvida, boa condutividade elétrica e

abundância de grupos funcionais superficiais (Leichtweis et al., 2021). Essas características favorecem a adsorção de poluentes e reduzem a recombinação dos pares e^-/h^+, aumentando a eficiência dos processos fotocatalíticos. Além disso, o biochar pode contribuir para a diminuição do *band gap* das ferritas suportadas, favorecendo sua ativação sob luz visível e aumentando o desempenho em POAs. Outro aspecto relevante é o fato do biochar ser produzido a partir de resíduos de biomassa, como resíduos agrícolas, urbanos e industriais, tornando sua aplicação alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular. Dessa forma, a utilização de resíduos para produzir materiais capazes de degradar poluentes persistentes em águas residuais representa uma abordagem ambientalmente sustentável e tecnologicamente promissora para aplicações em POAs.

A Tabela 2 apresenta estudos reportados na literatura envolvendo a utilização de ferritas suportadas em biochar aplicadas em POAs. Os trabalhos apresentados demonstram o crescente interesse no desenvolvimento de materiais compósitos à base de ferritas e biochar para degradação de poluentes orgânicos em águas residuais. De modo geral, os estudos investigam diferentes composições de ferritas, tipos de biomassa utilizadas na produção do biochar e condições operacionais, evidenciando a influência dessas variáveis no desempenho fotocatalítico dos materiais. Além disso, os resultados reportados destacam que o suporte das ferritas em biochar pode contribuir para o aumento da área superficial, melhoria da separação de cargas fotogeradas, redução da recombinação dos pares elétron/lacuna e maior eficiência na geração de espécies reativas oxidantes, favorecendo a degradação de contaminantes persistentes em sistemas aquosos.

Tabela 2 – Estudos sobre suporte de ferritas em biochar para degradação de poluentes orgânicos.

Compósito	Poluente ($mg\ L^{-1}$)	Massa ($g\ L^{-1}$)	Processo	Eficiência (%)	Tempo (min)	Ref.
$ZnFe_2O_4$@ Biochar (Eucalyptus sawdust residues)	Rhodamina B	0,7	foto-Fenton	99	45	(Chen et al., 2024)
$MnFe_2O_4$/ Biochar (Eichhornia crassipes residues)	Verde malaquita	0,3	Ativação de peroximono-ssulfato	95	15	(Chen et al., 2023)
BIOCHAR/ $NIFE_2O_4$/ AG_3PO_4 (sugarcane residues)	Azul de metileno	2,6	fotode-gradação	94	90	(Kaveh et al., 2024)
$CuFe_2O_4$@ Biochar (Eucalyptus sawdust residues)	Verde malaquita	0,2	Degradação usando persulfato	98.9	90	(Huang et al., 2021b)
$CoFe_2O_4$/ Biochar (Chitin residues)	Ponceau	1,0	foto-Fenton	100	60	(Leichtweis et al., 2025)
$ZnFe_2O_4$/ Biochar (Chitin residues)	Ponceau e Azul de metileno	1,0	foto-Fenton	100	60	(Leichtweis et al., 2023a)

5. CONCLUSÃO

As ferritas suportadas em biochar têm se destacado como materiais promissores para aplicação em POAs no tratamento de águas residuais contendo poluentes orgânicos persistentes. A combinação entre ferritas do tipo espinélio e biochar permitem a obtenção de compósitos com desempenho fotocatalítico superior em relação aos materiais puros, devido à maior área superficial, melhoria da separação e transferência de cargas fotogeradas, redução da recombinação dos pares e^-/h^+ e maior aproveitamento da radiação visível. Além disso, as propriedades magnéticas das ferritas favorecem a recuperação e reutilização dos fotocatalisadores, contribuindo para a viabilidade operacional dos processos. O uso de biochar produzido a partir de resíduos de biomassa representa uma abordagem alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular, uma vez que agrega valor a resíduos agroindustriais e reduz impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais. Dessa forma, a utilização de resíduos para a produção de compósitos fotocatalíticos capazes de degradar contaminantes de difícil remoção configura uma alternativa ambientalmente sustentável, economicamente viável e tecnologicamente eficiente para aplicações em POAs. Embora avanços significativos já tenham sido alcançados, ainda são necessários estudos voltados à otimização das condições operacionais, avaliação da estabilidade a longo prazo, aplicação em efluentes reais e ampliação da escala dos processos, visando consolidar o uso desses materiais em aplicações ambientais práticas.

REFERÊNCIAS

[1] Abbaci, F., Nait-Merzoug, A., Guellati, O., Harat, A., El Haskouri, J., Delhalle, J., Mekhalif, Z., Guerioune, M., 2022. Bio/KOH ratio effect on activated biochar and their dye based wastewater depollution. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 162, 105452. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105452

[2] Alsufyani, H., Alkabli, J., Almulaiky, Y.Q., 2026. Sustainable hybrid magnetic–carbon–polymer supports for horseradish peroxidase immobilization and dye degradation. Surfaces and Interfaces 87, 108976. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2026.108976

[3] Andrade, J.G. da S., Porto, C.E., Moreira, W.M., Batistela, V.R., Scaliante, M.H.N.O., 2023. Production of hydrochars from Pinus caribaea for biosorption of methylene blue and tartrazine yellow dyes. Cleaner Chemical Engineering 5, 100092. https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100092

[4] Borba, F.H., Leichtweis, J., Bueno, F., Pellenz, L., Inticher, J.J., Seibert, D., 2019. Pollutant removal and acute toxicity assessment (Artemia salina) of landfill leachate treated by photo-Fenton process mediated by oxalic acid. Journal of Water Process Engineering 28, 159–168. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.01.017

[5] Bueloth, M.R., Pantaleón, A.J.S., Visalot, J.P., Esparza–Huamanchumo, R.M., 2026. Community participation, governance, and environmental education as drivers of local sustainable development: Tutumberos community, Peruvian Amazon. World Development Sustainability 8, 100283. https://doi.org/10.1016/j.wds.2026.100283

[6] Cechinel, M.A.P., de Oliveira Guidolin, T., da Silveira, A.R., dos Santos Tasca, J., Montedo, O.R.K., Arcaro, S., 2022. Coal mining pyritic waste in Fenton-like processes: Raw and purified catalysts in Reactive Blue 21 dye discoloration. Science of The Total Environment 807, 150823. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150823

[7] Cen, H., Zhu, W., Li, Y., Song, Y., Xu, Z., Tan, P., Cao, S., Gao, Y., Huang, Y., 2026. Recyclable dye-sensitized TiO2 composite membranes with interfacial spectral complementarity for sustainable white-light-driven dye degradation. RSC Advances 16, 7590–7602. https://doi.org/10.1039/d5ra09829g

[8] Chen, C., Gao, W., Fan, H., Huang, X., Tong, Z., 2024. Facile single-step synthesis of ZnFe2O4@biochar for synergistic adsorption and photo-Fenton degradation of RB and RBR binary dyes.

Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 163, 105641. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105641

[9] Chen, X.-L., Li, H., Lai, L., Zhang, Y., Chen, Y., Li, X., Liu, B., Wang, H., 2023. Peroxymonosulfate activation using MnFe2O4 modified biochar for organic pollutants degradation: Performance and mechanisms. Separation and Purification Technology 308, 122886. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122886

[10] Das, Suma, Das, Soumik, Nair, R.G., Chowdhury, A., 2023. Magnetically separable ZnFe2O4 grafted g-C3N4/rGO ternary nanocomposites for enhanced photo-Fenton catalytic activity under visible light. Materials Today Sustainability 21, 100263. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100263

[11] de Oliveira, J.S., Brondani, M., Mallmann, E.S., Jahn, S.L., Foletto, E.L., Silvestri, S., 2018. Preparation of Highly Efficient CoFe2O4/Zn2SnO4 Composite Photocatalyst for the Degradation of Rhodamine B Dye from Aqueous Solution. Water, Air, & Soil Pollution 229, 386. https://doi.org/10.1007/s11270-018-4038-0

[12] Fabris, L.C., Ferreira Piazzi Fuhr, A.C., Machado, F.M., Swarowsky, A., Foletto, E.L., Souza, D.M., Carissimi, E., Leichtweis, J., 2026. Rice husk waste biochar as a photocatalyst support for use in the degradation of organic pollutants. Chemical Engineering Science 325, 123497. https://doi.org/10.1016/j.ces.2026.123497

[13] Hong, R.Y., Chen, Q., 2015. Dispersion of Inorganic Nanoparticles in Polymer Matrices: Challenges and Solutions, in: Kalia, S., Haldorai, Y. (Eds.), Organic-Inorganic Hybrid Nanomaterials. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–38. https://doi.org/10.1007/12_2014_286

[14] Huang, Q., Chen, C., Zhao, X., Bu, X., Liao, X., Fan, H., Gao, W., Hu, H., Zhang, Y., Huang, Z., 2021a. Malachite green degradation by persulfate activation with CuFe2O4@biochar composite: Efficiency, stability and mechanism. Journal of Environmental Chemical Engineering 9, 105800. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105800

[15] Huang, Q., Chen, C., Zhao, X., Bu, X., Liao, X., Fan, H., Gao, W., Hu, H., Zhang, Y., Huang, Z., 2021b. Malachite green degradation by persulfate activation with CuFe2O4@biochar composite: Efficiency, stability and mechanism. Journal of Environmental Chemical Engineering 9, 105800. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105800

[16] Kaveh, R., Mortazavi, M., Alijani, H., Abdouss, M., Dehkalani, A.S., Mazinani, S., 2024. Ternary nanohybrid of biochar/ NiFe2O4 /Ag3PO4 for simultaneous adsorption of Hg(II) and photodegradation of methylene blue; modeling, kinetic and isotherm studies. Journal of Solid State Chemistry 331, 124503. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2023.124503

[17] Krishnan, S., Rawindran, H., Sinnathambi, C.M., Lim, J.W., 2017. Comparison of various advanced oxidation processes used in remediation of industrial wastewater laden with recalcitrant pollutants. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 206, 012089. https://doi.org/10.1088/1757-899X/206/1/012089

[18] Kumar Biswal, A., Sahoo, M., Kumar Suna, P., Panda, L., Lenka, C., Kumari Misra, P., 2022. Exploring the adsorption efficiency of a novel cellulosic material for removal of food dye from water. Journal of Molecular Liquids 350, 118577. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118577

[19] Ledakowicz, S., Pázdzior, K., 2021. Recent achievements in dyes removal focused on advanced oxidation processes integrated with biological methods. Molecules 26. https://doi.org/10.3390/molecules26040870

[20] Leichtweis, J., Silvestri, S., Carissimi, E., 2020. New composite of pecan nutshells biochar-ZnO for sequential removal of acid red 97 by adsorption and photocatalysis. Biomass and Bioenergy 140, 105648. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105648

[21] Leichtweis, J., Silvestri, S., Vieira, Y., de Lima Burgo, T.A., Foletto, E.L., 2021. A novel tin ferrite/polymer composite use in photo-Fenton reactions. International Journal of Environmental Science and Technology 18, 1537–1548. https://doi.org/10.1007/s13762-020-02944-1

[22] Leichtweis, Jandira, Silvestri, S., Welter, N., Vieira, Y., Zaragoza-Sánchez, P.I., Chávez-Mejía, A.C., Carissimi, E., 2021. Wastewater containing emerging contaminants treated by residues from the brewing industry based on biochar as a new CuFe2O4 / biochar photocatalyst. Process Safety and Environmental Protection 150, 497–509. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.041

[23] Leichtweis, J., Vieira, Y., Dotto, G.L., Carissimi, E., 2023a. Chitin biochar as an effective and low-cost alternative for improving electron charge transfer of supported ZnFe2O4 during catalytic oxidation of high molar mass pollutants. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 677, 132364. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132364

[24] Leichtweis, J., Vieira, Y., Dotto, G.L., Carissimi, E., 2023b. Chitin biochar as an effective and low-cost alternative for improving electron charge transfer of supported ZnFe2O4 during catalytic oxidation of high molar mass pollutants. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 677, 132364. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132364

[25] Leichtweis, J., Welter ,Nicoly, Vieira ,Yasmin, Storck ,Tamiris Rosso, Clasen ,Bárbara, Silvestri ,Siara, and Carissimi, E., 2025. Treatment and ecotoxicity assessment of wastewater containing organic pollutants using a new CoFe2O4/biochar photocatalyst composite. Environmental Technology 46, 1268–1279. https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2382936

[26] Liandi, A.R., Cahyana, A.H., Kusumah, A.J.F., Lupitasari, A., Alfariza, D.N., Nuraini, R., Sari, R.W., Kusumasari, F.C., 2023. Recent trends of spinel ferrites (MFe2O4: Mn, Co, Ni, Cu, Zn) applications as an environmentally friendly catalyst in multicomponent reactions: A review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 7, 100303. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100303

[27] Lu, S., Ma, Y., Zhao, L., 2022. Production of ZnO-CoOx-CeO2 nanocomposites and their dye removal performance from wastewater by adsorption-photocatalysis. Journal of Molecular Liquids 364, 119924. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119924

[28] Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M.I., Blanco, J., Gernjak, W., 2009. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. Catalysis Today 147, 1–59. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018

[29] Mansour, M.S., Farid, Y., Nosier, S.A., Adli, O., Abdel-Aziz, M.H., 2023. Removal of Eosin Yellow dye from industrial wastewater using UV/H2O2 and photoelectro-Fenton techniques. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 436, 114411. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114411

[30] Márquez, A.A., Coreño, O., Nava, J.L., 2022. An innovative process combining electrocoagulation and photoelectro-Fenton-like methods during the abatement of Acid Blue 113 dye. Process Safety and Environmental Protection 163, 475–486. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.061

[31] Mekha, K.B., Talip Yusof, N.A., Sudhakar, K., Zainol, N., Hasan, N., Abdul Karim, M.S., 2024. Development of Sustainable Polymer-based Dielectric Composites from Agricultural Waste: A Review. Heliyon e39118. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39118

[32] Miao, S., Xia, H., Gao, H., Mao, X., Shi, M., Zhang, Y., 2022. Metal-organic frameworks-derived CoFeN-NC materials with the enhanced catalytic activity and selectivity for the degradation of organic dyes via adsorption and heterogeneous photo-Fenton. Applied Surface Science 601, 154028. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154028

[33] Oliveira, J.S. de, Halmenschlager, F. da C., Jahn, S.L., Foletto, E.L., 2019. Síntese de CoFe2O4 sobre os suportes MgAl2O4 e ZSM-5 para uso na degradação de poluente orgânico pelo processo foto-Fenton heterogêneo sob irradiação visível e solar. Matéria (Rio de Janeiro) 24.

[34] Oller, I., Malato, S., Sánchez-Pérez, J.A., 2011. Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination—A review. Science of The Total Environment 409, 4141–4166. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.061

[35] Pinoargote-Chang, M.H., Fernández-Andrade, A., Zambrano-Intriago, L.A., Quiroz-Fernández, L.S., Villanueva-Ramos, G., Montenegro, M.C.B.S.M., Rodríguez-Díaz, J.M., 2022. Photo-Fenton process for the degradation of blue 1 dye and estradiol benzoate hormone in binary system: Application of sunlight and UV-C radiation. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 6, 100226. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100226

[36] Sanabria, P., Scunderlick, D., Wilde, M.L., Lüdtke, D.S., Sirtori, C., 2021. Solar photo-Fenton treatment of the anti-cancer drug anastrozole in different aqueous matrices at near-neutral pH: Transformation products identification, pathways proposal, and in silico (Q)SAR risk assessment. Science of The Total Environment 754, 142300. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142300

[37] Sanabria, P., Wilde, M.L., Ruiz-Padillo, A., Sirtori, C., 2022. Trends in Fenton and photo-Fenton

processes for degradation of antineoplastic agents in water matrices: current knowledge and future challenges evaluation using a bibliometric and systematic analysis. Environmental Science and Pollution Research 29, 42168–42184. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15938-4

[38] Santos, D.H. da S., Xiao, Y., Chaukura, N., Hill, J.M., Selvasembian, R., Zanta, C.L.P.S., Meili, L., 2022. Regeneration of dye-saturated activated carbon through advanced oxidative processes: A review. Heliyon 8, e10205. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10205

[39] Shahzad, K., Hussain, S., Altaf Nazir, M., Jamshaid, M., ur Rehman, A., Alkorbi, A.S., Alsaiari, R., Alhemiary, N.A., 2022. Versatile Ag2O and ZnO nanomaterials fabricated via annealed Ag-PMOS and ZnO-PMOS: An efficient photocatalysis tool for azo dyes. Journal of Molecular Liquids 356, 119036. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119036

[40] Shan, A.Y., Ghazi, T.I.Mohd., Rashid, S.A., 2010. Immobilisation of titanium dioxide onto supporting materials in heterogeneous photocatalysis: A review. Applied Catalysis A: General 389, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.08.053

[41] Sheikhpoor, H., Saljooqi, A., Shamspur, T., Mostafavi, A., 2021. Co-Al Layered double hydroxides decorated with CoFe2O4 nanoparticles and g-C3N4 nanosheets for efficient photocatalytic pesticide degradation. Environmental Technology & Innovation 23, 101649. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101649

[42] Shi, K.-X., Qiu, F., Wang, P., Li, H., Wang, C.-C., 2022. Magnetic MgFe2O4/MIL-88A catalyst for photo-Fenton sulfamethoxazole decomposition under visible light. Separation and Purification Technology 301, 121965. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121965

[43] Silva, E.C., Soares, V.R., Fajardo, A.R., 2023. Removal of pharmaceuticals from aqueous medium by alginate/polypyrrole/ZnFe2O4 beads via magnetic field enhanced adsorption. Chemosphere 316, 137734. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137734

[44] Sivakumar, P., Ramesh, R., Ramanand, A., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C., 2011. Synthesis and characterization of nickel ferrite magnetic nanoparticles. Materials Research Bulletin 46, 2208–2211. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2011.09.009

[45] SOUFI, A., HAJJAOUI, H., ELMOUBARKI, R., ABDENNOURI, M., QOURZAL, S., BARKA, N., 2021. Spinel ferrites nanoparticles: Synthesis methods and application in heterogeneous Fenton oxidation of organic pollutants – A review. Applied Surface Science Advances 6, 100145. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100145

[46] Srikanth, B., Goutham, R., Badri Narayan, R., Ramprasath, A., Gopinath, K.P., Sankaranarayanan, A.R., 2017. Recent advancements in supporting materials for immobilised photocatalytic applications in waste water treatment. Journal of Environmental Management 200, 60–78. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.063

[47] Sun, X., Huang, L., Wang, G., Feng, H., Zhou, S., Zhao, R., Wang, D., Li, Z., 2022. Efficient degradation of tetracycline under the conditions of high-salt and coexisting substances by magnetic CuFe2O4/g-C3N4 photo-Fenton process. Chemosphere 308, 136204. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136204

[48] Tabassam, N., Mutahir, S., Khan, M.A., Khan, I.U., Habiba, U., Refat, M.S., 2022. Facile synthesis of cinnamic acid sensitized rice husk biochar for removal of organic dyes from wastewaters: Batch experimental and theoretical studies. Materials Chemistry and Physics 288, 126327. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126327

[49] Tatarchuk, T., Al-Najar, B., Bououdina, M., Ahmed, M.A.A., 2019. Catalytic and Photocatalytic Properties of Oxide Spinels, in: Martínez, L.M.T., Kharissova, O.V., Kharisov, B.I. (Eds.), Handbook of Ecomaterials. Springer International Publishing, Cham, pp. 1701–1750. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_158

[50] Thomas, N., Dionysiou, D.D., Pillai, S.C., 2021. Heterogeneous Fenton catalysts: A review of recent advances. Journal of Hazardous Materials 404, 124082. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124082

[51] Thor, S.-H., Ho, L.-N., Ong, S.-A., Abidin, C.Z.A., Heah, C.-Y., Nordin, N., Ong, Y.-P., Yap, K.-L., 2021. Advanced oxidation treatment of amaranth dye synchronized with electricity generation using carbon-based cathodes in a sustainable photocatalytic fuel cell integrated electro-fenton system. Journal of Environmental Chemical Engineering 9, 106439. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106439

[52] Wang, X., Chen, Y., 2022. ZnIn2S4/CoFe2O4 p-n junction-decorated biochar as magnetic recyclable

nanocomposite for efficient photocatalytic degradation of ciprofloxacin under simulated sunlight. Separation and Purification Technology 303, 122156. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122156

[53] Wang, Zirun, Li, Y., Xie, X., Wang, Zhaowei, 2021. Bifunctional MnFe2O4/chitosan modified biochar composite for enhanced methyl orange removal based on adsorption and photo-Fenton process. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 613, 126104. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.126104

[54] Welter, N., Leichtweis, J., Silvestri, S., Sánchez, P.I.Z., Mejía, A.C.C., Carissimi, E., 2022. Preparation of a new green composite based on chitin biochar and ZnFe2O4 for photo-Fenton degradation of Rhodamine B. Journal of Alloys and Compounds 901, 163758. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163758

[55] Xia, J., Shen, Y., Zhang, H., Hu, X., Mian, M.M., Zhang, W.-H., 2022. Synthesis of magnetic nZVI@biochar catalyst from acid precipitated black liquor and Fenton sludge and its application for Fenton-like removal of rhodamine B dye. Industrial Crops and Products 187, 115449. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115449

[56] Yan, J., Chai, B., Liu, Y., Fan, G., Song, G., 2023. Construction of 3D/2D ZnFe2O4/g-C3N4 S-scheme heterojunction for efficient photo-Fenton degradation of tetracycline hydrochloride. Applied Surface Science 607, 155088. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155088

[57] Zhang, M.-K., Ling, X.-H., Zhang, X.-H., Han, G.-Z., 2022. A novel alginate/PVA hydrogel -supported Fe3O4 particles for efficient heterogeneous Fenton degradation of organic dyes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 652, 129830. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129830

[58] Zhao, F., Xiao, J., Geng, S., Wang, Y., Tsiakaras, P., Song, S., 2022. Novel Fe7S8/C nanocomposites with accelerating iron cycle for enhanced heterogeneous electro-Fenton degradation of dyes. Electrochimica Acta 436, 141381. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141381

Capítulo 12

Síntese e caracterização de ZIF-8: influência do solvente na formação do nanomaterial

Ana Vitória Santos Marques
João Victor Silva Sousa
Tellys Lins Almeida Barbosa
Meiry Gláucia Freire Rodrigues

Resumo: O ZIF-8, uma subfamília de estruturas metal-orgânicas (MOFs) microporosas, tem despertado grande interesse científico devido às suas propriedades excepcionais, que o tornam aplicável em diversas áreas, como catálise, eletroquímica, adsorção, separação de gases, liberação controlada de fármacos e tratamento de água. As características do ZIF-8 estão diretamente relacionadas às condições de síntese, incluindo tempo de reação, solvente, sais de zinco, razão molar e aditivos. Neste estudo, propõe-se sintetizar o ZIF-8 utilizando diferentes solventes (metanol, etanol e água) e avaliar a influência do solvente no processo de síntese e na formação do nanomaterial. As sínteses foram realizadas pelos métodos solvotérmico e hidrotérmico, e os nanomateriais obtidos foram caracterizados por Difração de Raios-X (DRX) e Análise Termogravimétrica (TG). Os resultados de DRX confirmaram a formação bem-sucedida do ZIF-8 com metanol e etanol como solventes, enquanto a síntese com água resultou em uma estrutura distinta, ZIF-L. Além disso, observou-se que o rendimento obtido com etanol, 29,20%, foi levemente superior ao obtido com metanol, 26,56%. Este estudo mostra a importância da escolha do solvente na síntese de ZIF-8.

Palavras-chaves: MOFs, métodos de síntese, síntese solvotérmica, síntese hidrotérmica.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas metal-orgânicas, conhecidas como MOFs (do inglês Metal-Organics Frameworks), são uma classificação especial de materiais cristalinos formados por íons metálicos ou aglomerados metálicos coordenados a ligantes orgânicos, resultando em uma rede molecular que apresenta demasiada ordenação e porosidade, com poros interconectados (Abdelhameed; El-Shahat, 2025; Cai et al., 2025).

Ao longo dos últimos anos, eles têm se destacado à conta das suas propriedades, como excelente estabilidade térmica e química, controle sobre o tamanho e a forma dos poros, estruturas de rede personalizáveis, além da facilidade de funcionalização das paredes porosas, entre outros. (Patra; Pal, 2025).

Além disso, os MOFs englobam diversas aplicações, dentre elas pode-se destacar: armazenamento e separação de gases, catálise heterogênea, detecção química, condutividade de prótons, filtragem de ar e tratamento de água (Jiao et al., 2019).

Uma subfamília de MOFs microporosos é a Estrutura de Zinco Imidazol-8, também chamadas de ZIF-8 (do inglês Zinc imidazolate frameworks-8). Eles são formados por íons Zn+2 conectados a ligantes de 2-metilimidazol (Xu et al., 2025).

O ZIF-8 tem despertado bastante interesse devido à sua alta estabilidade térmica e química (Sahu et al., 2025), elevada área superficial, estrutura altamente porosa e baixa densidade (Suliman et al., 2024).

Ademais, o ZIF-8 é bastante versátil, sendo utilizado em uma vasta área de aplicações como: catálise, eletroquímica, adsorção, separação de gases (Ai et al., 2025), transferência de elétrons e remoção de poluentes de águas residuais (Zhang et al., 2024).

Por isso, foram desenvolvidos vários métodos de produção do ZIF-8, incluindo o solvotérmico convencional em diferentes solventes orgânicos, como dimetilformamida e metanol, além das abordagens assistidas por microondas, sonoquímica, mecanoquímica, gel seco e microfluídica (Lee et al., 2015).

Independentemente do método, cada abordagem possui seus ônus e bônus. resultando na formação de ZIF-8 com diferentes morfologias (tamanho e forma) (Du; Sanchez; Du, 2025).

Por exemplo, a síntese assistida por micro-ondas tem um custo elevado em virtude da necessidade de reatores caros. Por outro lado, a síntese solvotérmica pode demandar muitas horas para ser concluída (Cereceda; Du, 2025)

Independentemente do método de síntese empregado, as características do ZIF-8 também estão relacionadas às condições preparação, como tempo de reação, solvente, sais de zinco, razão molar e aditivos (Zhang et al., 2018). Assim, alguns estudiosos analisaram a influência da fonte de zinco na morfologia e no tamanho de ZIF-8 (Schejn et al., 2014).

Outros pesquisadores estudaram o efeito da concentração do precursor, e observaram que o ajuste da razão molar entre o nitrato de zinco hexahidratado ($Zn(NO3)2·6H2O$) e 2-metilimidazol (MeIm) à temperatura ambiente pode melhorar a cristalinidade em razões molares mais elevadas (Zhang et al., 2018).

Por isso, o presente estudo propõe estudar a influência do solvente no processo de síntese do ZIF-8, avaliando como a variação entre metanol, etanol e água impacta a formação do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Conduziram-se os experimentos no Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais (LABNOV), pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia Química, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEQ/CCT/UFCG), Paraíba, Brasil.

2.1. MATERIAIS

Neste trabalho, o Quadro 1 apresenta os reagentes e equipamentos que foram operados e usados no desenvolvimento da pesquisa.

Quadro 1 - Reagentes e equipamentos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

Reagentes	Equipamentos
Nitrato de zinco hexahidratado ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$, Sigma-Aldrich, 98%)	Balança analítica – Marte, AL 500C
2-metilimidazol ($C_4H_6N_2$, 2-MeIM, Sigma-Aldrich, 99%)	Agitador magnético – INTLLAB™
Metanol (CH_3OH, NEON, 99,8%)	Centrífuga – Sinergia Científica, LGI-DLC-802B
Etanol (CH_3CH_2OH, NEON, 99,5%)	Estufa – Quimis
Água destilada	

Fonte: Autoria própria (2026).

2.2. METODOLOGIA DE SÍNTESE DO ZIF-8

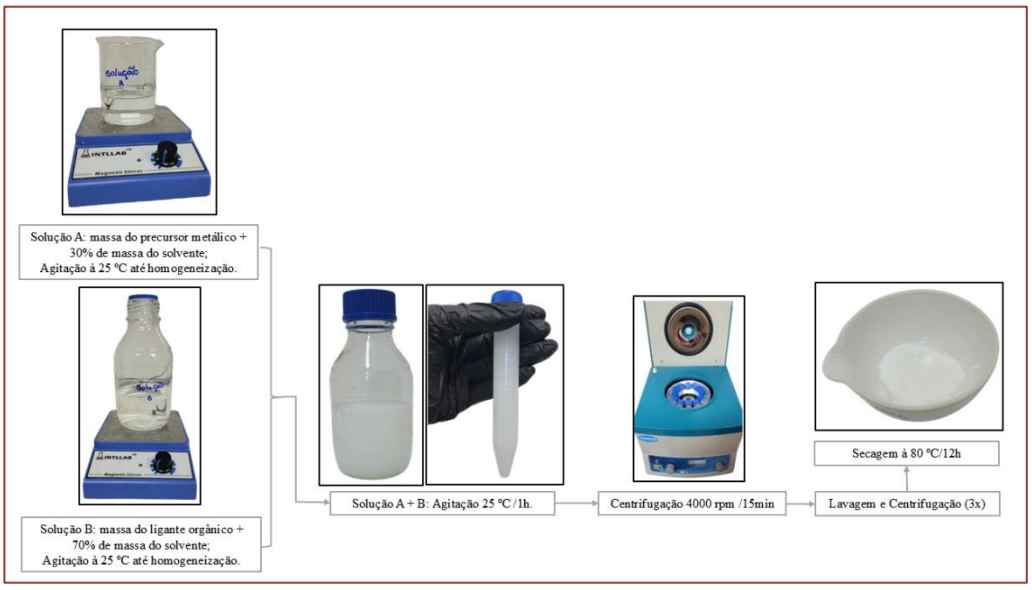
A metodologia utilizada para a síntese do ZIF-8 foi baseada em adaptações dos procedimentos descritos por Cravillon *et al.* (2009) e Şahin, Topuz e Kalipçilar, (2018). Primeiramente, a síntese foi conduzida utilizando uma mistura reacional com composição molar de 1 $Zn(NO_3)_2.6H_2O$: 8 $C_4H_6N_2$: 500 CH_3OH. Posteriormente, o metanol foi substituido por etanol e, por último, água.

O procedimento consistiu na dissolução da massa do precursor metálico ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) em 30% da massa total de solvente, formando a Solução A. Paralelamente, a massa de ligante ($C_4H_6N_2$) foi dissolvida nos 70% restantes do solvente, resultando na Solução B. Após a completa homogeneização das soluções, a Solução A foi adicionada lentamente, por gotejamento, à Solução B sob agitação constante.

Com a Solução A totalmente gotejada na Solução B, iniciou-se o tempo de 60 minutos de cristalização ainda sob agitação constante. O sólido obtido foi separado por centrifugação a 4000 rpm e lavado três vezes com o solvente. Por fim, o material foi secado em estufa à 80 ºC por 12h.

A Figura 1, representa o diagrama com fotos das etapas de preparação do nanomaterial.

Figura 01. Diagrama do procedimento de síntese do ZIF-8.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Para melhor organização e identificação dos materiais sintetizados, adotou-se um sistema de codificação específico para cada solvente utilizado no processo. Assim, o material obtido a partir do metanol foi denominado ZIFM, enquanto aquele sintetizado com etanol recebeu a sigla ZIFE. Já o material produzido utilizando água como solvente foi designado como ZIFA*.

2.3. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Difração de raios X (DRX) - As amostras obtidas com os diferentes solventes foram caracterizadas por difração de raios X, utilizando um difratômetro Rigaku Miniflex 600, operando com radiação Cu Kα (λ = 0,15418 nm), velocidade do goniômetro de 10,0º min-1, voltagem de 40 kV, corrente de 15 mA, tamanho do passo de 0,02º e ângulo de varredura 2θ de 5,0º a 40,0º, no Laboratório de Adsorção e Catálise Aplicada (LACAp) do Centro de Pesquisas em Materiais Avançados e Energia (CPqMAE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Tamanho médio do cristalito - O tamanho médio do cristalito foi estimado por meio da equação de Scherrer que relaciona a largura à meia altura dos picos de difração de raios X com as dimensões dos cristalitos.

Foram considerados os planos cristalinos com índices hkl = 011, 002, 112, 022, 013, 222, 114, 233, 224, 134, 044, 334, 244, 235, obtendo-se os respectivos valores de 2θ (º). A partir desses dados, aplicou-se a equação de Scherrer, Equação 4, para calcular o tamanho do cristalito, em ångström, que posteriormente foi convertido para nanômetros.

$$D_{hkl} = \frac{K \times \lambda_{CuK\alpha}}{\beta_{hkl} \times cos\theta_{hkl}} \qquad (4)$$

na qual:

- D_{hkl} corresponde a dimensão do cristal perpendicular ao plano hkl de difração (Å);
- K é a constante de Scherrer de proporcionalidade;
- $\lambda_{CuK\alpha}$ é o comprimento de onda da radiação utilizada, igual a 1,5418 Å;
- β_{hkl} é a largura à meia altura do pico da linha de difração (rad);
- θ_{hkl} é o ângulo de Bragg do plano cristalino (rad).

Com os quatorze valores de D_{hkl} obtidos, calculou-se a média aritmética, resultando no tamanho médio do cristalito da amostra.

Análise Termogravimétrica (TG) - As análises termogravimétricas das amostras foram medidas usando um analisador termogravimétrico (DTG-60H, Shimadzu). O peso da amostra foi de 10,033 mg e a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min. Os testes foram realizados da temperatura ambiente até 1000 °C sob atmosfera de N_2 com um fluxo de 50 mL/min.

Rendimento da síntese - Para avaliar o rendimento da síntese do ZIF-8, foram adotadas duas abordagens de cálculo (Equações 5 e 6). A primeira relaciona a massa do material sintetizado com a massa do precursor metálico utilizado. A segunda considera a massa total de sólidos no meio reacional, relacionando tanto o precursor metálico quanto o ligante orgânico.

$$R_1(\%) = \frac{m_{ZIF}}{m_{precursor}} \times 100 \quad (5)$$

$$R_2(\%) = \frac{m_{ZIF}}{m_{precursor} + m_{ligante}} \times 100 \quad (6)$$

em que:

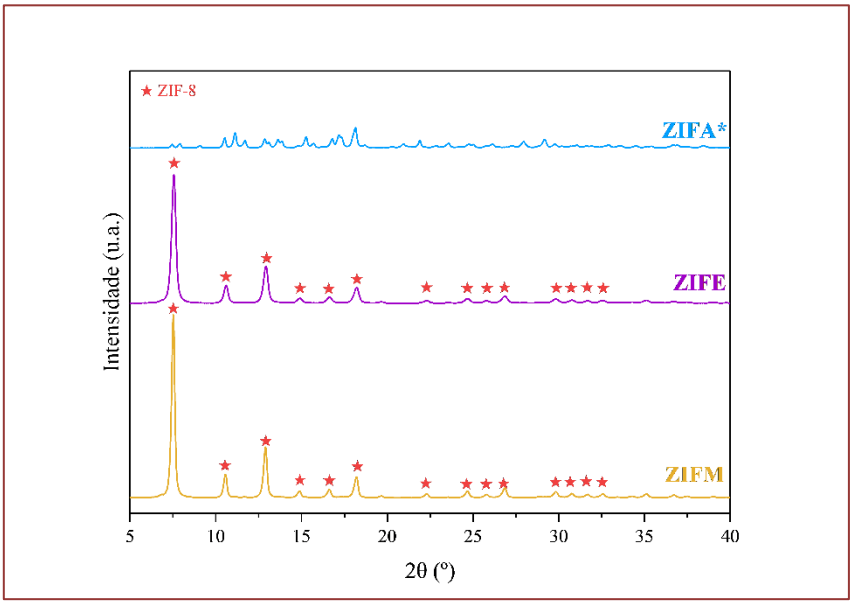
- $R_1(\%)$ e $R_2(\%)$ corresponde ao rendimento das sínteses;
- m_{ZIF} é a massa de produto sólido obtido experimentalmente (g);
- $m_{precursor}$ é a massa do precursor metálico utilizada (g);
- $m_{ligante}$ é a massa do ligante orgânico utilizada (g).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A Figura 2 apresenta os difratogramas de raios X para as estruturas sintetizadas com diferentes solventes (metanol, etanol e água).

Figura 03. Difratograma de Raios-X dos materiais obtidos com diferentes solventes.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Os difratogramas apresentados mostram que os padrões de DRX experimentais das estruturas sintetizadas com metanol e etanol estão em concordância com os padrões teóricos obtidos a partir de dados de cristal único (Park *et al.*, 2006) e também estão semelhantes aos reportados na literatura descritos por diversos pesquisadores (Cravillon *et al.*, 2009; Rodrigues; Barbosa; Rodrigues, 2020; Sann *et al.*, 2018). Isso evidencia que os nanomateriais sintetizados estão livres de impurezas, além de confirmar que as sínteses de ZIFE e ZIFM foram realizadas com sucesso.

No entanto, ao analisar a estrutura obtida com água como solvente, observa-se que ela apresenta um perfil cristalino nitidamente distinto da estrutura do ZIF-8. Esse comportamento já foi documentado em diversos estudos, os quais relataram a ausência de formação do ZIF-8 quando a água foi utilizada como solvente (Nordin *et al.*, 2014; De Paula, 2023; Butova *et al.*, 2017; Jin; Shang, 2021). Por esse motivo, foi conduzida uma pesquisa na literatura para identificar o material formado, constatando-se que a estrutura obtida corresponde ao ZIF-L. O ZIF-L é uma estrutura ZIF em camadas bidimensionais, composta pelos mesmos blocos de construção do ZIF-8. Embora ambos compartilhem a mesma composição química, o ZIF-L é considerado um polimorfo não poroso do ZIF-8. Essa diferença estrutural, com o ZIF-L apresentando uma organização em camadas bidimensionais, resulta na ausência de poros, contrastando com a estrutura tridimensional porosa do ZIF-8. O ZIF-L tem sido estudado em diversas pesquisas, com cientistas investigando métodos para converter o ZIF-L em ZIF-8, a fim de aproveitar as propriedades únicas da forma porosa e tridimensional do ZIF-8 (Pérez-Miana; Reséndiz-Ordóñez; Coronas, 2021; Deacon *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2022).

Diante disso, como o foco deste estudo é o ZIF-8, não foram realizadas caracterizações adicionais para a amostra denominada ZIFA*, uma vez que esta apresentou a estrutura ZIF-L. As análises subsequentes foram direcionadas exclusivamente para as amostras ZIFM e ZIFE, por estarem alinhadas aos objetivos da pesquisa.

3.2. TAMANHO MÉDIO DO CRISTALITO

Um cristalito é uma região sólida com estrutura cristalina uniforme e orientação cristalográfica homogênea. Seu tamanho pode variar de alguns nanômetros a vários milímetros. Essa estrutura se forma durante a síntese, como no resfriamento e solidificação ou em reações químicas. Em essência, o cristalito é um parâmetro estrutural do material (Hassanzadeh-Tabrizi, 2023).

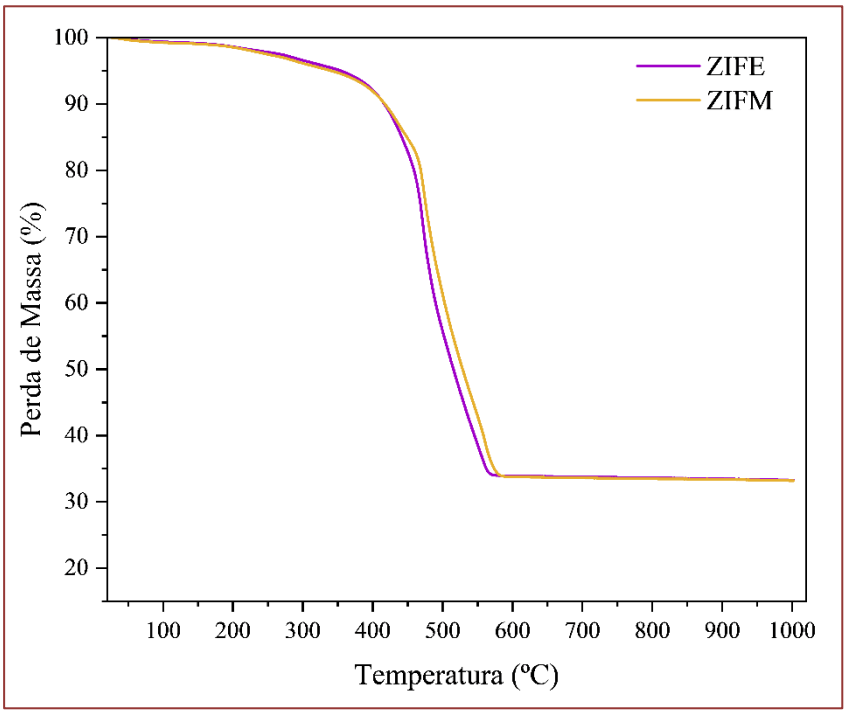
Na síntese do ZIF-8, o tamanho médio dos cristalitos variou conforme o solvente utilizado. O material obtido com metanol apresentou o maior tamanho médio de cristalito, enquanto aquele sintetizado em etanol exibiu o menor valor. Em ambos os casos, os cristais encontram-se em escala nanométrica, sendo que o nanomaterial sintetizado com metanol apresentou um tamanho médio de 49,23 nm, enquanto os obtidos em etanol tiveram um tamanho médio de 32,74 nm. Esses resultados estão em concordância com estudos anteriores, como o de Bustamante, Fernández e Zamaro (2014) que encontraram valores de tamanho médio de cristalito de 42,1 nm e 31,3 nm, para o metanol e etanol respectivamente.

O solvente pode influenciar tanto aspectos termodinâmicos quanto cinéticos durante a formação de MOFs, e uma das formas pelas quais isso ocorre é atuando como um agente direcionador de estrutura (ADE). Em um estudo realizado pelos autores Tian *et al.* (2007), foi observado que certos solventes orgânicos desempenham um papel crucial como ADE ou como agentes de molde primário na síntese de imidazolatos com topologias zeolíticas. O efeito de molde primário acontece quando o solvente funciona como um "molde" para a estrutura do material, sendo incorporado à rede por meio de interações não covalentes (como ligações de hidrogênio ou forças de Van der Waals). Por outro lado, o efeito ADE ocorre quando o solvente favorece a formação do MOF ou acelera sua taxa de crescimento, sem necessariamente ser incorporado à estrutura final. Com base na discussão acima e considerando os resultados experimentais, nos quais foram obtidas fases de ZIF-8 quase idênticas utilizando álcoois distintos, mas com variações significativas no tamanho dos cristalitos, é possível concluir que o solvente provavelmente atua como um agente direcionador de estrutura (ADE). Isso sugere que o solvente influencia diretamente o processo de nucleação e crescimento dos cristais, sem alterar a topologia básica do material, mas afetando suas propriedades físicas, como o tamanho das nanopartículas (Tanaka; Kitagawa, 2007; Bajpe *et al.*, 2010; Bustamante; Fernández; Zamaro, 2014).

3.3. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A Figura 13 apresenta a análise termogravimétrica dos nanomateriais sintetizados.

Figura 04. Análise termogravimétrica dos nanomateriais (ZIFM e ZIFE) obtidos com diferentes solventes (metanol e etanol).



Fonte: Autoria Própria (2026).

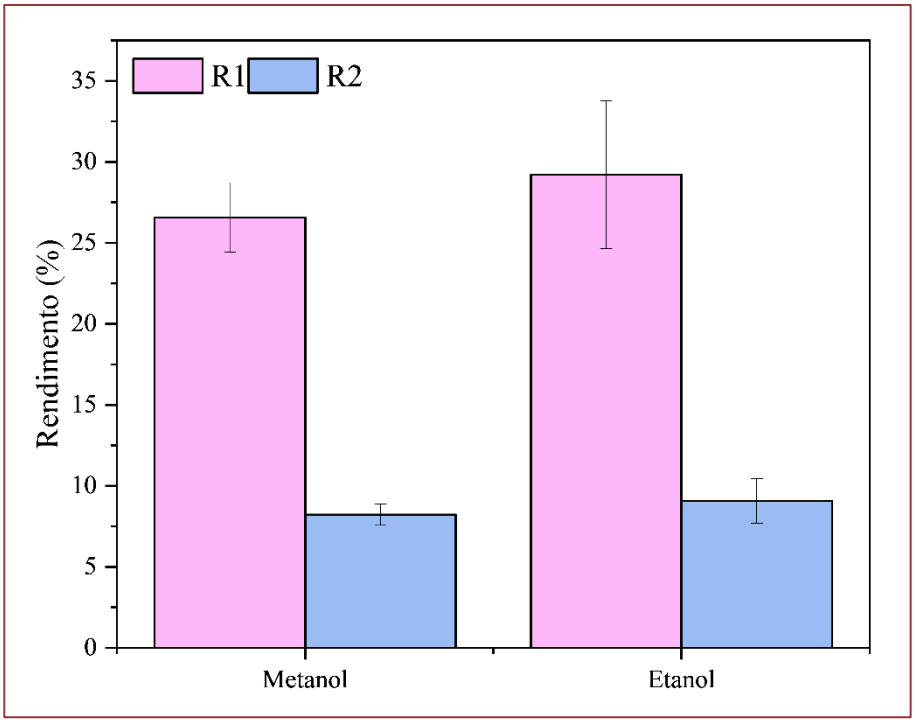
A estabilidade térmica de materiais cristalinos, um dos parâmetros de avaliação importantes, refere-se à capacidade de manter suas propriedades sem sofrer danos sob mudanças de temperatura externa. Essa característica é muito importante, pois a limitação da estabilidade térmica influencia diretamente o desempenho futuro da aplicação do ZIF-8 (Jin; Shang, 2021).

Nas amostras ZIFM e ZIFE, a perda de massa inicial foi resultado da evaporação do solvente (metanol ou etanol), aproximadamente 2%. Uma redução significativa de massa, aproximadamente 58%, foi observada entre 399 e 560 ºC, associada à decomposição da rede, ou seja, ocorre a degradação térmica dos ligantes orgânicos do ZIF-8, resultando no colapso de sua estrutura metalorgânica. Por fim, nenhuma perda adicional foi registrada a partir de 580 ºC, aproximadamente, até 1000 ºC. (Cho et al., 2013; Davoodian et al., 2020).

3.4. RENDIMENTO DA SÍNTESE

Na Figura 4 estão ilustrados os rendimentos da síntese do ZIF-8 utilizando metanol e etanol como solventes.

Figura 05. Rendimentos dos nanomateriais com diferentes solventes.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Analisando a Figura 14, pode-se observar que o rendimento do ZIF-8 sintetizado com metanol apresenta o menor valor de rendimento R_1, 26,56%, possivelmente devido a fatores como a menor solubilidade do precursor metálico de zinco. O etanol, por sua vez, demonstra um rendimento R_1 um pouco maior, 29,20%, embora não muito distante do obtido com metanol, sugerindo que ambos os solventes orgânicos possuem limitações semelhantes no processo de síntese. Além disso, os rendimentos seguem uma tendência similar àquela reportada por De Paula (2023). Essa diferença nos rendimentos reforça a importância da escolha do solvente adequado na síntese de materiais porosos como o ZIF-8.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas, é possível concluir que a síntese do ZIF-8 foi bem-sucedida quando foram utilizados metanol e etanol como solventes, seguindo o método solvotérmico. A técnica de DRX desempenhou um papel fundamental na caracterização dos nanomateriais, permitindo identificar que, sob as condições experimentais adotadas neste estudo, o uso de água como solvente levou à formação do ZIF-L, uma fase distinta do ZIF-8.

Além disso, os dados revelaram que o rendimento da síntese foi maior quando o etanol foi empregado como solvente, 29,20%, sugerindo que esse meio reacional pode ser mais eficiente para a obtenção do material.

Por outro lado, observou-se que o tamanho médio dos cristalitos do ZIF-8 foi maior quando o metanol foi utilizado, 49,23 nm, indicando que esse solvente pode favorecer o crescimento dos nanocristais em comparação ao etanol. Ademais, pela análise

termogravimétrica, observou-se que os materiais apresentam uma boa estabilidade térmica.

Dessa forma, esses resultados mostram a importância da escolha do solvente e das condições reacionais no processo de síntese, uma vez que tais fatores influenciam diretamente a formação, o rendimento e as propriedades cristalográficas dos materiais obtidos. Portanto, este trabalho contribui para a compreensão de como variáveis como o solvente podem impactar a síntese e as características de materiais como os ZIFs.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Adsorção e Catálise Aplicada (LACAp) do Centro de Pesquisas em Materiais Avançados e Energia (CPqMAE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pela realização das análises de Difração de Raios X (DRX), fundamentais para a caracterização dos materiais estudados.

REFERÊNCIAS

[1] ABDELHAMEED, Reda M.; EL-SHAHAT, Mahmoud. The role of carboxylic acid contents in calcium-based metal-organic frameworks for the enhancement of Biginelli reaction. **Journal Of Molecular Structure**, [S.L.], v. 1321, p. 139742, fev. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139742.

[2] AI, Sihan; XIANG, Yong; CHEN, Xue; ZHANG, Yanlin; ZHANG, Yufei; LV, Kangning; CHEN, Xin; YU, Daoyong; GE, Baosheng; HUANG, Fang. ZIF-8 and ZIF-67 as catalysts for promoting carbon dioxide capture based on monoethanolamine solution. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 358, p. 130389, jun. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130389.

[3] BAJPE, Sneha R.; KIRSCHHOCK, Christine E. A.; AERTS, Alexander; BREYNAERT, Eric; ABSILLIS, Gregory; PARAC-VOGT, Tatjana N.; GIEBELER, Lars; MARTENS, Johan A.. Direct Observation of Molecular-Level Template Action Leading to Self-Assembly of a Porous Framework. **Chemistry – A European Journal**, [S.L.], v. 16, n. 13, p. 3926-3932, 26 mar. 2010. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/chem.200903239.

[4] BUSTAMANTE, Eugenia L.; FERNÁNDEZ, José L.; ZAMARO, Juan M.. Influence of the solvent in the synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanocrystals at room temperature. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 424, p. 37-43, jun. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2014.03.014.

[5] BUTOVA, V.V.; BUDNYK, A.P.; BULANOVA, E.A.; LAMBERTI, C.; SOLDATOV, A.V.. Hydrothermal synthesis of high surface area ZIF-8 with minimal use of TEA. **Solid State Sciences**, [S.L.], v. 69, p. 13-21, jul. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2017.05.002.

[6] CAI, Jinliang; ZHENG, Xu; PAN, Quanwen; LI, Dan; WANG, Weining. Advances in hygroscopic metal-organic frameworks for air, water & energy applications. **Applied Energy**, [S.L.], v. 377, p. 124362, jan. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124362.

[7] CERECEDA, Cristina Sanchez; DU, Yuncheng. Effect of synthesis parameters on ZIF-8 morphology: insights from experimental and statistical integrated analysis. **Microporous And Mesoporous Materials**, [S.L.], v. 390, p. 113588, maio 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2025.113588.

[8] CHO, Hye-Young; KIM, Jun; KIM, Se-Na; AHN, Wha-Seung. High yield 1-L scale synthesis of ZIF-8 via a sonochemical route. **Microporous And Mesoporous Materials**, [S.L.], v. 169, p. 180-184, mar. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.11.012.

[9] CRAVILLON, Janosch; MÜNZER, Simon; LOHMEIER, Sven-Jare; FELDHOFF, Armin; HUBER, Klaus; WIEBCKE, Michael. Rapid Room-Temperature Synthesis and Characterization of Nanocrystals of a Prototypical Zeolitic Imidazolate Framework. **Chemistry Of Materials**, [S.L.], v. 21, n. 8, p. 1410-1412, 26 mar. 2009. American Chemical Society (ACS). http://dx.doi.org/10.1021/cm900166h.

[10] DAVOODIAN, Negin; POUR, Ali Nakhaei; IZADYAR, Mohammad; MOHAMMADI, Ali; SALIMI, Alireza; SHAHRI, Seyed Mehdi Kamali. Fischer–Tropsch synthesis using zeolitic imidazolate framework (ZIF-7 and ZIF-8)-supported cobalt catalysts. **Applied Organometallic Chemistry**, [S.L.], v. 34, n. 9, 8 jun. 2020. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/aoc.5747.

[11] DEACON, Adam; BRIQUET, Ludovic; MALANKOWSKA, Magdalena; MASSINGBERD-MUNDY, Felicity; RUDIć, Svemir; HYDE, Timothy L.; CAVAYE, Hamish; CORONAS, Joaquín; POULSTON, Stephen; JOHNSON, Timothy. Understanding the ZIF-L to ZIF-8 transformation from fundamentals to fully costed kilogram-scale production. **Communications Chemistry**, [S.L.], v. 5, n. 1, 9 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1038/s42004-021-00613-z.

[12] DE PAULA, Gustavo Medeiros. **Produção de estruturas metalôrganicas do tipo ZIF-L, ZIF-67 e ZIF-8 para a utilização como adsorventes no tratamento de efluentes farmacêuticos**. 2023. Relatório (Pós-Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

[13] DU, Yuncheng; SANCHEZ, Cristina; DU, Dongping. Machine learning based insights for metal-organic frameworks synthesis: a comparative and explainable analysis of zif-8 morphology. **Materials Today Communications**, [S.L.], v. 42, p. 111177, jan. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111177.

[14] HASSANZADEH-TABRIZI, S.A.. Precise calculation of crystallite size of nanomaterials: a review. **Journal Of Alloys And Compounds**, [S.L.], v. 968, p. 171914, dez. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171914.

[15] JIAO, Long; SEOW, Joanne Yen Ru; SKINNER, William Scott; WANG, Zhiyong U.; JIANG, Hai-Long. Metal–organic frameworks: structures and functional applications. **Materials Today**, [S.L.], v. 27, p. 43-68, jul. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2018.10.038.

[16] JIN, Chun-Xin; SHANG, Hai-Bo. Synthetic methods, properties and controlling roles of synthetic parameters of zeolite imidazole framework-8: a review. **Journal Of Solid State Chemistry**, [S.L.], v. 297, p. 122040, maio 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122040.

[17] LEE, Yu-Ri; JANG, Min-Seok; CHO, Hye-Young; KWON, Hee-Jin; KIM, Sangho; AHN, Wha-Seung. ZIF-8: a comparison of synthesis methods. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 271, p. 276-280, jul. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.094.

[18] NORDIN, N. A. H. M.; ISMAIL, A. F.; MUSTAFA, A.; GOH, P. S.; RANA, D.; MATSUURA, T.. Aqueous room temperature synthesis of zeolitic imidazole framework 8 (ZIF-8) with various concentrations of triethylamine. **Rsc Adv.**, [S.L.], v. 4, n. 63, p. 33292-33300, 2014. Royal Society of Chemistry (RSC). http://dx.doi.org/10.1039/c4ra03593c.

[19] PARK, Kyo Sung; NI, Zheng; CÔTÉ, Adrien P.; CHOI, Jae Yong; HUANG, Rudan; URIBE-ROMO, Fernando J.; CHAE, Hee K.; O'KEEFFE, Michael; YAGHI, Omar M.. Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 103, n. 27, p. 10186-10191, 5 jul. 2006. Proceedings of the National Academy of Sciences. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0602439103.

[20] PATRA, Kankan; PAL, Haridas. Lanthanide-based metal–organic frameworks (Ln-MOFs): synthesis, properties and applications. **Rsc Sustainability**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 629-660, 2025. Royal Society of Chemistry (RSC). http://dx.doi.org/10.1039/d4su00271g.

[21] PÉREZ-MIANA, Marta; RESÉNDIZ-ORDÓÑEZ, Javier U.; CORONAS, Joaquín. Solventless synthesis of ZIF-L and ZIF-8 with hydraulic press and high temperature. **Microporous And Mesoporous Materials**, [S.L.], v. 328, p. 111487, dez. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111487.

[22] RODRIGUES, Meiry Gláucia Freire; BARBOSA, Tellys Lins Almeida; RODRIGUES, Diogo Pierre Alves. Zinc imidazolate framework-8 nanoparticle application in oil removal from oil/water emulsion and reuse. **Journal Of Nanoparticle Research**, [S.L.], v. 22, n. 11, 26 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11051-020-05036-w.

[23] ŞAHIN, Fatma; TOPUZ, Berna; KALIPÇILAR, Halil. Synthesis of ZIF-7, ZIF-8, ZIF-67 and ZIF-L from recycled mother liquors. **Microporous And Mesoporous Materials**, [S.L.], v. 261, p. 259-267, maio 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.11.020.

[24] SAHU, Kumkum Priyadarshini; SINGH, Suryabhan; SINGH, Ashish Kumar; AZAD, Uday Pratap;

YADAV, Dibya; KUMAR, Vinod; SINGH, Sunil Kumar. Nanomaterials via ZIF-8: preparations, catalytic and drug delivery applications. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 508, p. 160663, mar. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2025.160663.

[25] SANN, Ei Ei; PAN, Yong; GAO, Zhongfeng; ZHAN, Shenshan; XIA, Fan. Highly hydrophobic ZIF-8 particles and application for oil-water separation. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 206, p. 186-191, nov. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.027.

[26] SCHEJN, Aleksandra; BALAN, Lavinia; FALK, Véronique; ARANDA, Lionel; MEDJAHDI, Ghouti; SCHNEIDER, Raphaël. Controlling ZIF-8 nano- and microcrystal formation and reactivity through zinc salt variations. **Crystengcomm**, [S.L.], v. 16, n. 21, p. 4493-4500, 2014. Royal Society of Chemistry (RSC). http://dx.doi.org/10.1039/c3ce42485e.

[27] SULIMAN, Muath; ALTALBAWY, Farag M.A.; KAUR, Mandeep; JAIN, Vicky; ARIFFIN, I.A.; KUMARI, Bharti; SAINI, Suman; KUBAEV, Aziz; HUSSEIN, Uday Abdul-Reda; EDAN, Reem Turki. Exploring green synthesis and characterization of ZIF-8 and recent developments in anti-infective applications. **Inorganic Chemistry Communications**, [S.L.], v. 170, p. 113333, dez. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113333.

[28] TANAKA, Daisuke; KITAGAWA, Susumu. Template Effects in Porous Coordination Polymers. **Chemistry Of Materials**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 922-931, 15 dez. 2007. American Chemical Society (ACS). http://dx.doi.org/10.1021/cm7031866.

[29] TIAN, Yun-Qi; ZHAO, Yu-Ming; CHEN, Zhen-Xia; ZHANG, Guang-Ning; WENG, Lin-Hong; ZHAO, Dong-Yuan. Design and Generation of Extended Zeolitic Metal–Organic Frameworks (ZMOFs): synthesis and crystal structures of zinc(ii) imidazolate polymers with zeolitic topologies. **Chemistry – A European Journal**, [S.L.], v. 13, n. 15, p. 4146-4154, 4 maio 2007. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/chem.200700181.

[30] XU, Xiaoya; JIAO, Chengli; LI, Xinxin; ZHANG, Xiaoqian; SHU, Lun; SU, Ge; HUANG, Minghua; JIANG, Heqing. Thermally induced in-situ growth strategy for flexible ZIF-8 composite membranes with efficient hydrogen separation. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 505, p. 158973, fev. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2024.158973.

[31] YU, Chanjong; KIM, Young Jae; KIM, Jongbum; EUM, Kiwon. ZIF-L to ZIF-8 Transformation: morphology and structure controls. **Nanomaterials**, [S.L.], v. 12, n. 23, p. 4224, 27 nov. 2022. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/nano12234224.

[32] ZHANG, Shuqin; WANG, Jieni; WEI, Chenlin; LIU, Peiliang; QIN, Shumeng; CAO, Leichang; ZHOU, Yanmei; ZHANG, Jinglai; ZHANG, Shicheng. Efficient CO2 capture by ZIF-8-derived in-situ nitrogen-doped nanoporous carbon with ultra-high selectivity and stability. **Journal Of Environmental Chemical Engineering,** [S.L.], v. 12, n. 6, p. 114839, dez. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2024.114839.

[33] ZHANG, Yongyong; JIA, Ying; LI, Ming; HOU, Li'an. Influence of the 2-methylimidazole/zinc nitrate hexahydrate molar ratio on the synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 crystals at room temperature. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 8, n. 1, 9597, 25 jun. 2018. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-28015-7.

Autores

AUTORES

JOSÉ HENRIQUE PORTO SILVEIRA (ORGANIZADOR)

Bacharel e licenciado em Psicologia pela UFMG, Especialização em Percepção e Planejamento Urbano. Mestre em Gestão e Auditoria Ambiental, especialização em educação ambiental. Consultor em percepção e educação ambiental. Sócio diretor da Alternativa Educação e Manejo Ambiental.

ANA CAROLINA FERREIRA PIAZZI FUHR

Institute of Chemistry, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), 9500 Bento Gonçalves Av., Postal Box 15003, 91501-970 Porto Alegre, RS, Brazil. Research Group on Adsorptive and Catalytic Process Engineering (ENGEPAC), Federal University of Santa Maria, Av. Roraima, 1000-7, 97105–900 Santa Maria, RS, Brazil.

DELMIRA BEATRIZ WOLFF

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil

ELVIS CARISSIMI

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil

GLAUCIA MARIA BRENNY

Doutoranda em Engenharia Ambiental

JANDIRA LEICHTWEIS

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPG-IPH), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

LETÍCIA FABRIS

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil

NILO ANTÔNIO DE SOUZA SAMPAIO

Doutor em Engenharia Mecânica Universidade do Estado do Rio de Janeiro

TAIANE GUEDES

Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

VICTÓRIA DO NASCIMENTO RODRIGUES

Graduada em Engenharia de produção

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson